INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Febrero 2022 · nº 545 · 6,50 €

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

INTELIGENCIA ARTIFICIAL
Los algoritmos espían nuestras emociones

METEOROLOGÍA ESPACIAL
La amenaza de las superfulguraciones solares

BIOLOGÍA CELULAR
El lenguaje molecular de las células

CHOQUES DE GALAXIAS

Colisiones cósmicas que anuncian el futuro de la Vía Láctea

10 NUEVAS TÉCNICAS QUE CAMBIARÁN EL MUNDO

ÍNDICE

ARTÍCULOS

SECCIONES

APUNTES



CAMBIO CLIMÁTICO

ALBATROS DIVORCIADOS

La tasa de separaciones entre los albatros de ceja negra aumenta a medida que el océano se calienta

Pocos animales parecen más cariñosos que los albatros de ceja negra. Estas grandes aves marinas, cuyas cejas oscuras ensombrecen sus ojos como si llevaran rímel, son socialmente monógamas y a menudo se aparean de por vida. Sus «matrimonios» aparentemente románticos tienen un propósito práctico: permanecer con la misma pareja genera confianza, lo cual es esencial para que entre ambos miembros puedan alternar los largos viajes de búsqueda de comida y los deberes de incubación de los huevos.

Pero el «divorcio» no es algo inaudito. Como sucede en otras especies monógamas, las hembras de la familia de los albatros abandonarán una unión que carezca de éxito reproductivo. El proceso es más o menos discreto y está libre de ruidosas disputas, comenta el biólogo Francesco Ventura de la Universidad de Lisboa. A menudo, cuando una hembra de albatros considera que la alianza no ha tenido éxito en el transcurso de un año, simplemente aparecerá con un macho diferente en la siguiente temporada de reproducción.

Aunque el divorcio es natural entre los albatros, Ventura comenzó a notar que su tasa parecía variar de un año a otro entre las alrededor de 15.500 parejas de albatros de ceja negra que se reproducen en la isla de Goicochea, un afloramiento rocoso dentro de las Islas Malvinas. «Claramente hubo años en los que se separaron más parejas, en comparación con los años anteriores», explica Ventura, cuyo equipo examinó unos 15 años de datos de reproducción.

Para deducir qué causó estos picos de divorcios, el equipo se centró en dos variables ambientales vitales para los albatros: la velocidad del viento y la temperatura de la superficie del mar. Cada una afecta a las aves de diferentes formas. Por un lado, los vientos más fuertes les facilitan volar distancias mayores para recolectar alimentos. Por otro, el aumento de las temperaturas de la superficie marina reduce la disponibilidad de nutrientes para los albatros al disminuir la producción de fitoplancton, lo que tiene efectos en cascada sobre el resto de la red trófica marina. Como resultado, los albatros deben viajar más lejos y luchar más para encontrar suficiente comida. Esto altera los horarios de cría y aumenta los niveles de estrés entre las parejas, factores que pueden disminuir el éxito reproductivo.

En un artículo publicado el 24 de noviembre en *Proceedings of the Royal Society B*, Ventura y su equipo concluyeron que el ascenso de las temperaturas del mar se asocia a unas mayores tasas de divorcio entre los albatros de ceja negra de la isla de Goicochea. Ello supone la primera prueba de que las condiciones ambientales aumentan tales tasas en poblaciones monógamas silvestres, según los investigadores.

Las temperaturas de la superficie marina más cálidas se relacionaron con un mayor número de albatros divorciados debido a los fallos en el proceso de cría. Además, el equipo descubrió que, en los años más cálidos, las hembras de albatros tendían a abandonar más a su pareja incluso después de episodios exitosos de reproducción. «Estas hembras son las más afectadas por el calentamiento», apunta Ventura. «Se divorcian más a menudo, cuando en teoría deberían de permanecer junto a su pareja anterior.» Ello puede deberse a lo que Ventura llama la «hipótesis de culpabilidad de la pareja», en la que la hembra padece a la vez el estrés causado por las condiciones ambientales y el mal desempeño de su pareja.

El experto plantea la hipótesis de que podrían manifestarse tendencias similares en otras poblaciones de aves marinas y posiblemente entre algunos mamíferos monógamos, lo que pone de relieve una consecuencia del cambio climático que quizá se pase por alto. Según Natasha Gillies, investigadora de la Universidad de Liverpool que estudia el comportamiento reproductivo de las aves marinas y que no participó en el reciente estudio, el fenómeno podría tener impactos pro-

PÁGINA ANTERIOR: SLOWMOTIONGLI/ISTOCK

fundos en las poblaciones más pequeñas de aves al disminuir las opciones de reproducción. «Si la situación es que el aumento de la temperatura de la superficie marina conlleva mayores tasas de divorcio, eso reduce el éxito reproductivo de la población en su conjunto», apunta. «En última instancia, se están trayendo menos albatros al mundo y ello va a impactar a la población de manera más amplia.»

Jack Tamisiea

CONSERVACIÓN

LUCHA CONTRA LAS ESPECIES INVASORAS

La audaz campaña contra los depredadores introducidos en Nueva Zelanda gana terreno

Hace mil años, las islas que hoy constituyen Nueva Zelanda gozaban de una naturaleza lujuriosa. Las aves, los reptiles y los invertebrados prosperaban en bosques exuberantes, a cientos de kilómetros de cualquier otra masa de tierra. Los colonizadores maoríes trajeron consigo en el siglo XIII las ratas polinesias como fuente de alimento, y juntos, humanos y roedores comenzaron a romper el equilibrio ecológico. La fauna autóctona entró en un proceso de extinción.

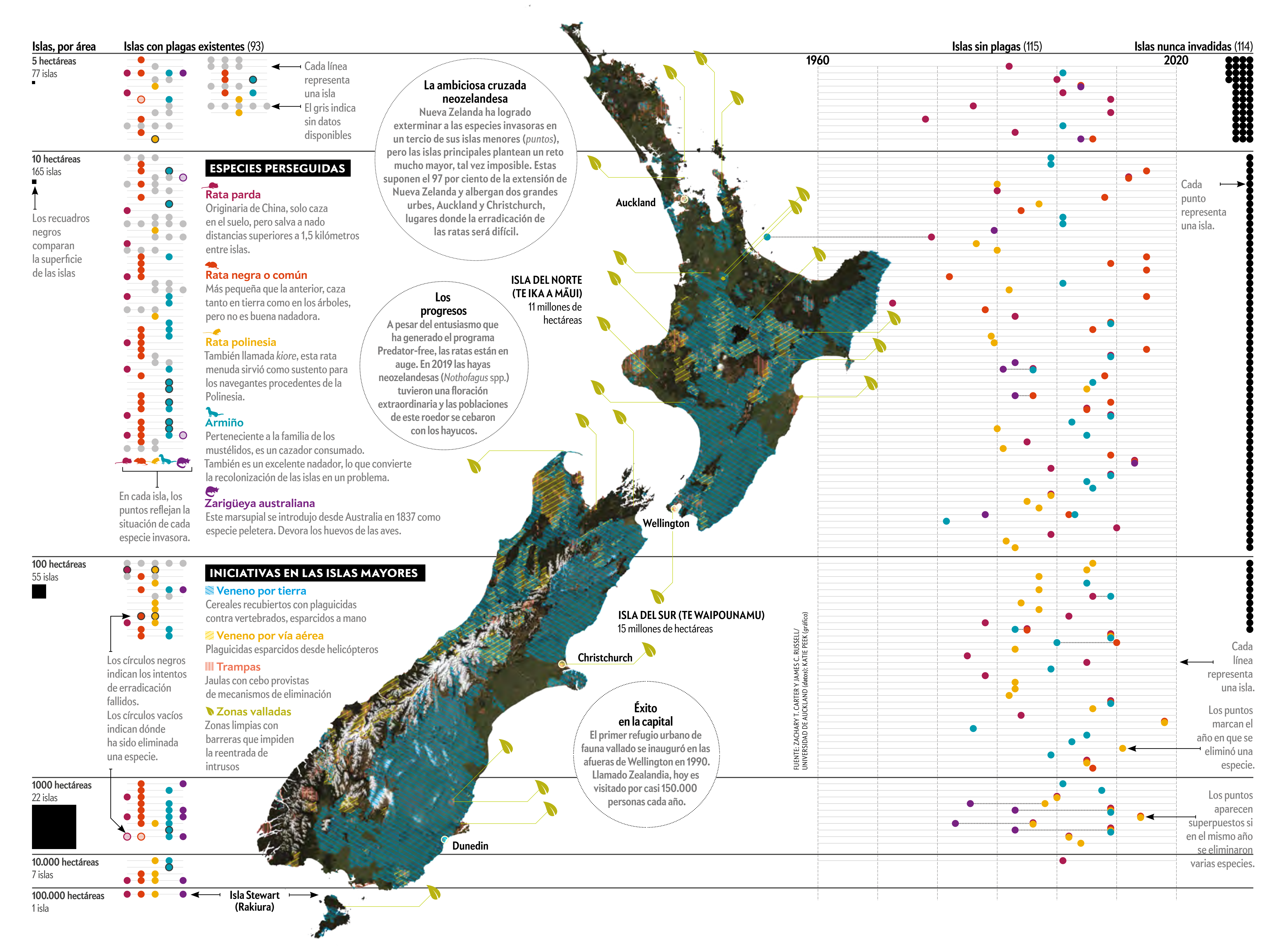
Más tarde arribarían los europeos a bordo de navíos, con polizones: especies de ratas más agresivas, ratones y armiños, entre otros. Estos depredadores terrestres no cazaban como los halcones y otras aves con los que la fauna neozelandesa había evolucionado. Las aves autóctonas que dormían en madrigueras fueron presa fácil para los mamíferos invasores. Estos se multiplicaron sin freno y devastaron la fauna insular.

Pero en los últimos 60 años los humanos han acudido en auxilio de los antiguos ecosistemas neozelandeses. Como primer paso, un solitario islote de dos hectáreas llamado Ruapuke fue declarado libre de ratas por los ecólogos en 1964, cinco años después de que un grupo de voluntarios esparciera cebo envenenado. Pero se trataba de un caso especial. Los paíños pechialbos (*Pelagodroma marina* subsp. *maoriana*) amenazados allí resultaban especialmente carismáticos, pues parecen caminar sobre el agua, por lo que lograron granjearse con facilidad el apoyo del público. La campaña sistemática de desratización también tuvo especial fortuna en virtud de su localización, aseguran los ecólogos. Sea como fuere, este éxito fortuito puso en marcha décadas de campañas de erradicación.

Desde entonces los ecólogos neozelandeses han ido exterminando plagas invasoras de isla en isla. Cerca de dos tercios de las islas menores del país están ya libres de alimañas, al igual que 27 reservas forestales valladas, situadas en las dos islas principales, que constituyen el 97 por ciento de la extensión del país. Protegida por las vallas o por el mar, la fauna local está renaciendo. Y en 2016 el primer ministro anunció un objetivo nacional inédito hasta la fecha: Predator-Free 2050.

La iniciativa tiene como meta acabar con todas las ratas, los armiños y las zarigüeyas que habitan en las más de 600 islas de Nueva Zelanda para ese año. «Estos tres depredadores están devorando nuestra fauna ante nuestros ojos», afirma el director del programa, Brent Beaven.

Es posible que algunos amantes de la naturaleza se escandalicen al saber que se exterminará a los armiños y a las zarigüeyas, pero el ecólogo de la Universidad de Auckland James Russell describe la situación como una grave disyuntiva ecológica: «Si no acabamos con los mamíferos, estaremos condenando a las aves a la extinción», sentencia.



Islas, por área
Islas con plagas existentes (93)
Islas sin plagas (115)
Islas nunca invadidas (114)
1960
2020
5 hectáreas
77 islas
Cada línea representa una isla
El gris indica sin datos disponibles
La ambiciosa cruzada neozelandesa
Nueva Zelanda ha logrado exterminar a las especies invasoras en un tercio de sus islas menores (puntos), pero las islas principales plantean un reto mucho mayor, tal vez imposible. Estas suponen el 97 por ciento de la extensión de Nueva Zelanda y albergan dos grandes urbes, Auckland y Christchurch, lugares donde la erradicación de las ratas será difícil.
10 hectáreas
165 islas
Los recuadros negros comparan la superficie de las islas
ESPECIES PERSEGUIDAS
Rata parda
Originaria de China, solo caza en el suelo, pero salva a nado distancias superiores a 1,5 kilómetros entre islas.
Rata negra o común
Más pequeña que la anterior, caza tanto en tierra como en los árboles, pero no es buena nadadora.
Rata polinesia
También llamada kiore, esta rata menuda sirvió como sustento para los navegantes procedentes de la Polinesia.
Armiño
Perteneciente a la familia de los mustélidos, es un cazador consumado. También es un excelente nadador, lo que convierte la recolonización de las islas en un problema.
Zarigüeya australiana
Este marsupial se introdujo desde Australia en 1837 como especie peletera. Devora los huevos de las aves.
En cada isla, los puntos reflejan la situación de cada especie invasora.
Los progresos
A pesar del entusiasmo que ha generado el programa Predator-free, las ratas están en auge. En 2019 las hayas neozelandesas (Nothofagus spp.) tuvieron una floración extraordinaria y las poblaciones de este roedor se cebaron con los hayucos.
Auckland
ISLA DEL NORTE (TE IKA A MĀUI)
11 millones de hectáreas
Wellington
Cada punto representa una isla.
100 hectáreas
55 islas
INICIATIVAS EN LAS ISLAS MAYORES
Veneno por tierra
Cereales recubiertos con plaguicidas contra vertebrados, esparcidos a mano
Veneno por vía aérea
Plaguicidas esparcidos desde helicópteros
Trampas
Jaulas con cebo provistas de mecanismos de eliminación
Zonas valladas
Zonas limpias con barreras que impiden la reentrada de intrusos
Los círculos negros indican los intentos de erradicación fallidos.
Los círculos vacíos indican dónde ha sido eliminada una especie.
ISLA DEL SUR (TE WAIPOUNAMU)
15 millones de hectáreas
Christchurch
Éxito en la capital
El primer refugio urbano de fauna vallado se inauguró en las afueras de Wellington en 1990. Llamado Zealandia, hoy es visitado por casi 150.000 personas cada año.
FUENTE: ZACHARY T. CARTER Y JAMES C. RUSSELL/ UNIVERSIDAD DE AUCKLAND (datos); KATIE PEEK (gráfico)
Cada línea representa una isla.
Los puntos marcan el año en que se eliminó una especie.
1000 hectáreas
22 islas
Los puntos aparecen superpuestos si en el mismo año se eliminaron varias especies.
Dunedin
10.000 hectáreas
7 islas
100.000 hectáreas
1 isla
Isla Stewart (Rakiura)

Russell califica la iniciativa como un amplio movimiento social. «La propuesta no arranca del Gobierno. Este ha hecho suyo algo que ya cuenta con el apoyo de numerosos colectivos», asegura. En Predator-Free 2050, las autoridades coordinan las actuaciones emprendidas por las universidades, diversas ONG, las reservas de fauna, los programas de rehabilitación de hábitats y por los propios ciudadanos concienciados que instalan trampas en el jardín de casa. Estos grupos están acabando con los depredadores, al tiempo que desarrollan venenos más específicos, recuperan la flora originaria, reintroducen especies autóctonas e idean nuevas formas de mantener a raya a los depredadores.

En Predator-Free 2050 también participan los maoríes, puntualiza Tame Malcom, cooperante del grupo ambientalista sin ánimo de lucro Te Tira Whakamataki: hace siglos que las tribus cazan ratas con trampas y su colaboración ha permitido mejorar la eficacia y reducir el coste del programa. «Nuestro lenguaje está demostrando ser casi imprescindible para los esfuerzos de restauración ecológica, porque los nombres de los lugares dan pistas sobre el aspecto que tuvieron antaño», añade. Por ejemplo, el topónimo Paekaka está compuesto por la palabra *horizonte* y el nombre de un loro, de lo que se deduce que en el pasado abundaba en el lugar.

Para cualquiera involucrado en la erradicación, el procedimiento básico es siempre el mismo: se elige una isla o una reserva natural, se emprende el exterminio sistemático de la fauna invasora y se establece un sistema de vigilancia para cerciorarse de que no recoloniza el entorno. Pero, por supuesto, la realidad es más compleja. Doug Armstrong, conservacionista de la Universidad Massey y director de la sección para Oceanía del grupo especializado en reintroducción de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, señala que no todas las especies autóctonas remontan con rapidez en las zonas que han quedado limpias. Aprender a desenvolverse y a encontrar alimento en los hábitats recuperados lleva su tiempo. Y con la competencia tan oportunamente eliminada, los ratones pueden ocupar el puesto de los desaparecidos y proliferar a expensas de los anfibios y los reptiles autóctonos.

Y luego está el problema del coste: «Los métodos de erradicación que estamos usando en este momento cuestan entre 600 y 1000 dólares neozelandeses por hectárea (entre 360 y 600 euros); sencillamente es inviable para todo el país», deja claro Beaven. Los responsables del programa esperan que la tecnología ayude. El pasado año los biólogos concluyeron la secuenciación del genoma de todas las especies indeseadas, lo que podría derivar en cebos específicos o en estrategias de edición génica parecidas a las de los recientes proyectos para el control de mosquitos en otros lugares. (Muchos neozelandeses se movilizaron para vetar los organismos genéticamente modificados hace veinte años y aún se sigue debatiendo la adopción de la edición génica.) Los ingenieros están diseñando trampas que reconozcan a las especies por sus huellas y los investigadores están fabricando drones para esparcir el cebo y vigilar grandes extensiones en busca de infiltrados. Las innovaciones del país ya están captando la atención en ultramar: Armstrong afirma que gran parte de las campañas de erradicación de especies invasoras en otros continentes tienen como referencia a los neozelandeses.

Pero mientras los partidarios afrontan los retos que supone acabar con los carnívoros invasores de un país entero, algunos ecólogos ponen en duda la premisa de la iniciativa, incluso en un enclave geográfico aislado como es Nueva Zelanda. Wayne Linklater, ambientólogo de la Universidad Estatal de Sacramento, en California, opina que la aniquilación total es irrealizable. En lugar de eso, aboga por la mitigación, a través de medidas como la protección de las zonas de cría o la creación de una red de refugios que permitan conservar las especies amenazadas con mayores garantías. Tácticas de este tipo han culminado con éxito en Australia y Sudáfrica.

Con todo, Beaven considera que tales estrategias son parches provisionales que exigen la constante intervención humana. Asegura que la única medida que permite realmente prosperar a la flora y la fauna autóctonas es la erradicación. Eso es lo que le gustaría ver a Scott Sambell, miembro de los equipos de campo del programa. Varias veces al año desembarca en las islas libres de ratas en compañía de un sabueso adiestrado. Su periplo incluye algunos enclaves que, como la isla Ruapuke, han permanecido sin alimañas desde hace medio siglo. «Cuando visitas una de ellas te sientes como un extraño. Es el dominio de las aves. Y es fabuloso.»

Maddie Bender

COMPORTAMIENTO ANIMAL

TACTO DE TIBURÓN



Peces de todo el mundo se frotan adrede contra los escualos

Lacey Williams estaba siguiendo con un dron a un tiburón blanco en la bahía de Plettenberg, en Sudáfrica, cuando observó que un banco de palometones (*Lichia amia*) comenzaba a perseguir al gran escualo con la intención de restregar su cuerpo contra la cola de este, como si de una piedra pómez se tratara. «Nos quedamos boquiabiertos», confiesa esta estudiante de posgrado en biología marina de la Universidad de Miami.

Numerosos estudios anteriores habían confirmado que un gran número de organismos marinos, incluidos los propios tiburones, se frotaban contra la arena y las rocas, presumiblemente para desembarazarse de molestos parásitos y bacterias. Pero a pesar de la existencia de relatos anecdóticos sobre la actividad que en este sentido mostraban otros peces con la áspera piel de los tiburones, nadie había emprendido un estudio formal acerca de este comportamiento.

Junto con su compañera Alexandra Anstett, otra estudiante de posgrado, William recopiló toda la documentación que pudieron descubrir: filmaciones desde drones, fotografías, videograbaciones de buceadores dando alimento a los peces y narraciones diversas. Contabilizaron 47 episodios en que 12 especies de peces óseos y una de tiburón usaban como rascador a ocho tipos de escualo (en este último caso, eran tiburones sedosos restregándose contra un gran tiburón ballena). Estos ejemplos abarcaban 13 lugares en tres mares, desde Massachusetts hasta México y las Galápagos. Los resultados, publicados en *Ecology*, muestran que el comportamiento está más extendido de lo que se pensaba. «Si es común en tantas especies, debe de tener alguna función ecológica», cree Williams.

La duración de los frotamientos va desde unos fugaces ocho segundos hasta más de cinco minutos. A veces se trata de un pez solitario, mientras que en otras participa un banco entero con un centenar de individuos o más. A muchos escualos no parece importarles servir como rascador viviente, aunque algunos tiburones blancos se agitaban y contorsionaban o se sumergían en espiral, supuestamente con la intención de zafarse de los molestos visitantes. Por sorprendente que pueda parecer, las investigadoras no presenciaron ningún ataque a los peces.

Jonathan Balcombe, etólogo independiente y autor del libro *What a fish knows* («Lo que sabe un pez»), afirma que el comportamiento «está en consonancia con la percepción, la inteligencia y el oportunismo de los peces, unas facultades cognitivas y emocionales que un creciente volumen de datos está demostrando». Tal vez simplemente disfruten de la sensación que provoca el roce contra la piel rasposa del tiburón, añade Balcombe, ajeno al estudio. Existen «tanto datos científicos como no contrastados acerca de la función terapéutica antiestresante que el tacto desempeña en los peces y otros animales».

Las autoras reconocen que el estudio plantea más incógnitas que respuestas: una es si el tiburón obtiene algún provecho o sale perjudicado de todo esto y por qué los peces eligen a un escualo y no un objeto inerte y aparentemente mucho más seguro, como una piedra o la arena. Al fin y al cabo, «jamás se ha visto a ninguna presa restregarse contra un león», comenta Anstett.

Rachel Nuwer

SCOTT BRUNDAGE

ÓPTICA

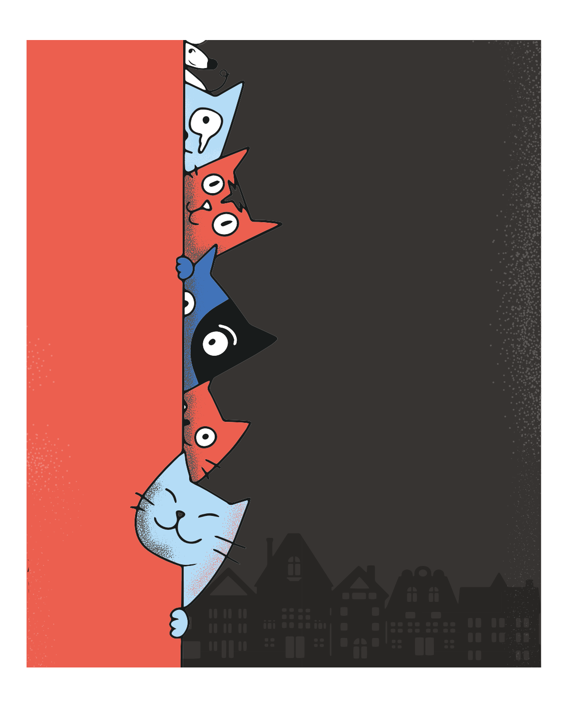
VER TRAS LAS ESQUINAS

Crean una cámara holográfica capaz de reconstruir las imágenes de objetos ocultos

Una nueva técnica de imagen podría permitir algún día que los médicos echen un vistazo dentro de los tejidos humanos y detrás de los huesos, que los mecánicos inspeccionen aparatos en movimiento (como las turbinas de los aviones) para localizar pequeños defectos, o que los vehículos autónomos vean a través de una densa niebla o en curvas sin visibilidad. Un estudio publicado en *Nature Communications* describe este método, llamado holografía de longitud de onda sintética, que proporciona fotografías detalladas y casi instantáneas de objetos ocultos.

Cuando la luz rebota en una pared o atraviesa un material turbio se dispersa, explica Atul Ingle, ingeniero eléctrico de la Universidad Estatal de Portland que no participó en el trabajo. Para atisbar lo que hay al otro lado de tales obstáculos «es preciso "deshacer" la dispersión y determinar las estructuras ocultas con una resolución muy alta». La nueva técnica supera esos retos y capta suficientes fotogramas por segundo como para crear un vídeo, añade Ingle.

El método consiste en enviar rayos láser con dos longitudes de onda ligeramente distintas contra un obstáculo (ya sea una pared o un material translúcido), para lograr que incidan sobre un objetivo oculto. Parte de la luz reflejada por este se capta y se superpone, generando un patrón de interferencia que revela la distancia al objeto que no podemos ver directamente. El proceso se basa en la interferometría, una técnica que se ha empleado para medir con precisión el tamaño y la forma de estrellas y estructuras celulares. Otras propuestas para obtener imágenes «sin línea de visión» tienen problemas para conseguir simultáneamente velocidades elevadas, altas resoluciones y campos de visión amplios. «Nuestro método combina todos esos atributos a la vez», afirma Florian Willomitzer, físico de la Universidad del Noroeste y primer autor del estudio.



9GEORGE/ISTOCK

Willomitzer y sus colaboradores demostraron que podían captar imágenes de letras milimétricas situadas a la vuelta de una esquina o tras láminas de plástico translúcidas. Los anteriores métodos de imagen escaneaban de forma iterativa miles de píxeles para componer una escena; sin embargo, este proceso precisó únicamente dos exposiciones (cada una de tan solo 23 milisegundos) para escanear un campo de visión casi semiesférico.

Combinando esta técnica con la ecografía, los médicos podrían ver detrás de los huesos o distinguir los capilares bajo la piel, sostiene Ingle. No obstante, los dos investigadores coinciden en que habrá que trabajar más y realizar más pruebas para que esa idea se materialice. Examinar una muestra de tejido vivo es más difícil que mirar a través de un plástico delgado, pero Ingle opina que, en unos 10 años, esta investigación podría dar lugar a un método comercial para divisar lo que se esconde más allá de la línea de visión.

Nikk Ogasa

BIOLOGÍA

LUZ EN LA NOCHE POLAR

Los crustáceos del Ártico siguen los ritmos circadianos aun sin sol

Durante el invierno en el Ártico, el sol desaparece varias semanas bajo el horizonte en la larga «noche polar». Pero ahora nuevas investigaciones revelan que los crustáceos diminutos de ese océano mantienen de algún modo el ritmo diario durante los largos períodos de oscuridad.

La mayoría de los procesos biológicos y los comportamientos de los seres vivos están pautados por la luz solar. Por eso la desaparición del orto y del ocaso supone un problema, más aún si uno habita bajo la superficie del mar, donde el agua atenúa la poca luz que incide. Pero el krill ártico, el diminuto crustáceo con aspecto de camarón que constituye una importante fuente de alimento para la fauna marina, ha desarrollado una ingeniosa adaptación para mantener sus hábitos durante la noche polar. Incluso bajo el agua es capaz de detectar variaciones ínfimas de la luz celeste conforme el astro rey se desplaza por debajo del horizonte, según un trabajo publicado en *PLOS Biology*.

«Los relojes biológicos del cuerpo anticipan lo que va a suceder, como la sensación de hambre que aparece cuando se acerca la hora de comer», explica el biólogo marino de la Universidad de Delaware Jonathan Cohen, autor principal del nuevo estudio. El comportamiento del krill hace patente que en la noche polar hay luz suficiente para mantener ese cronómetro biológico en ciertos animales.

Cohen y sus colaboradores estudiaron la especie de krill *Thysanoessa inermis* en el laboratorio y en su hábitat natural del Ártico, frente al archipiélago de las Svalbard. No solo constataron que es capaz de percibir variaciones mínimas de la tenue luz, sino que la actividad eléctrica de sus ojos se intensifica por la noche, un indicador del aumento de la fotosensibilidad. Y eso no es todo: además coordina sus desplazamientos a lo largo de la columna de agua tomando como referencia las débiles variaciones de la luminosidad, de modo que asciende a la superficie en busca de alimento en las horas de oscuridad absoluta y se sumerge en las profundidades durante las más «brillantes» para eludir a los depredadores. Cohen matiza que hasta el momento no se conocen muchos animales que ajusten su reloj biológico con intensidades de luz tan bajas, como las moscas o los ratones.



Krill ártico

No están seguros todavía de por qué el krill sigue nadando arriba y abajo durante las noches más oscuras. Emma Cavan, bióloga marina del Colegio Imperial de Londres que no ha participado en el estudio, explica que «sin luz no hay producción primaria ni floraciones de algas, así que no hay nada que comer. Por lo tanto, el motivo que les impulsa a ascender hasta la superficie sigue siendo uno de los grandes misterios de las migraciones verticales».

Daniela Mocker y Nikk Ogasa

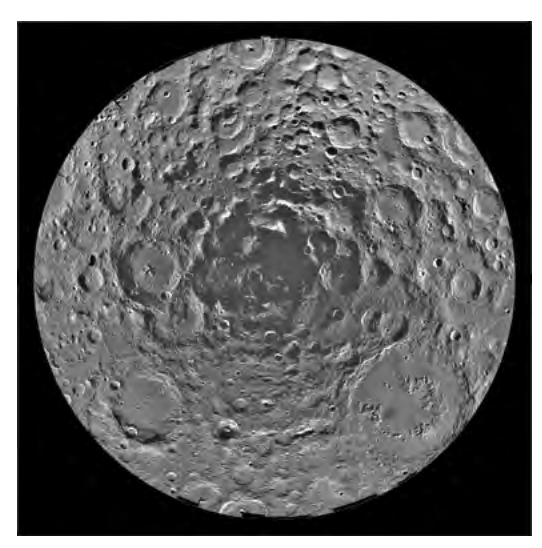
JONATHAN COHEN

TECNOLOGÍA

LAS ÁREAS SOMBRÍAS DE LA LUNA

Un algoritmo ilumina las oscuras regiones polares de nuestro satélite

Ciertas zonas cercanas a los polos de la Luna se hallan sumidas en una sombra perpetua y nunca reciben luz solar directa. Se ha sugerido que esas regiones permanentemente sombrías contienen abundantes reservas de hielo, que podrían revelar detalles sobre el sistema solar primitivo o ayudar a futuros visitantes a producir combustible y otros recursos. Sin embargo, fotografiar estas zonas desde los satélites que orbitan en torno a la Luna no es sencillo, de modo que su estudio plantea un reto. Los pocos fotones que se reflejan en las regiones de sombra a menudo quedan ocultos por el ruido estático de la cámara y los efectos cuánticos.



Algunas regiones del polo sur de la Luna siempre están a la sombra.

NASA/JPL/USGS

Ahora, los investigadores han desarrollado un algoritmo de aprendizaje profundo para eliminar las interferencias y observar esas regiones sombrías. «Nuestras imágenes permiten identificar accidentes geológicos, como cráteres y rocas, con diámetros de tan solo tres metros, lo que supone una resolución entre cinco y diez veces mayor que las de otros intentos anteriores», afirma Valentin Bickel, planetólogo del Instituto Max Planck para la Investigación del Sistema Solar de Gotinga y autor principal de un artículo publicado en *Nature Communications* donde se describe el nuevo algoritmo.

Los investigadores reunieron más de 70.000 imágenes de áreas lunares completamente oscuras, acompañadas de datos sobre la temperatura de la cámara y su posición en la órbita, y entrenaron el algoritmo para que reconociera y eliminara el ruido del aparato. Luego abordaron el problema del ruido residual, como el generado por los efectos cuánticos que experimentan los fotones en movimiento; en esa fase, el algoritmo aprendió a partir de millones de fotos de áreas lunares iluminadas por el Sol, acompañadas de imágenes simuladas de las mismas regiones a la sombra. Ignacio López-Francos, ingeniero del Centro de Investigación Ames de la NASA y coautor del estudio, explica que fue necesario usar esa oscuridad simulada porque no existen imágenes iluminadas de las regiones permanentemente sombrías. En la fotografía digital con baja iluminación se emplea una técnica similar.

«Es una aplicación interesante del aprendizaje automático, y el modelo del ruido parece realista y adecuado para este caso concreto», valora Chongyi Li, científico computacional de la Universidad de Tecnología de Nanyang que no participó en el estudio pero emplea estrategias parecidas para mejorar imágenes submarinas.

Los investigadores usaron el algoritmo para analizar el tamaño y la distribución de cráteres y rocas en varias regiones de sombra permanente que podrían explorarse en el marco del programa lunar Artemisa de la NASA. También evaluaron el origen de diversas rocas y trazaron una posible ruta para un vehículo explorador a través de una región sombría del

cráter Leibnitz, evitando obstáculos y pendientes con inclinaciones de más de 10 grados.

«Los polos suscitan un gran interés, no solo desde el punto de vista de la exploración humana, sino también por su topografía superficial», apunta José Miguel Hurtado, geólogo de la Universidad de Texas en El Paso ajeno al estudio. El hielo podría estar entremezclado en el suelo lunar o acumularse en capas más concentradas que deformarían el paisaje, añade. «Este tipo de procesamiento de imágenes permitirá poner a prueba algunas de esas hipótesis.»

Connie Chang

NEUROCIENCIA

CEREBRO SACIADO

Una región inédita del encéfalo ayuda a refrenar la glotonería

Las personas aquejadas por un trastorno genético minoritario llamado síndrome de Prader-Willi nunca se sienten saciadas y esa hambre pantagruélica puede derivar en una obesidad potencialmente mortal. Los estudiosos del problema han descubierto que el cerebelo, órgano con forma de puño que no se había vinculado con el hambre hasta el momento, es clave para regular la saciedad en los afectados.

Este descubrimiento es el más reciente de una serie que revela que el cerebelo, que durante mucho tiempo se consideró implicado principalmente en la coordinación motora, también desempeña amplios cometidos en la cognición, las emociones y el comportamiento. «Hemos abierto un campo entero en torno al control del apetito por parte del cerebelo», asevera Albert Chen, neurocientífico en el Instituto Scintillon de California.

El proyecto dio comienzo a raíz de una observación tan afortunada como fortuita: Chen y su equipo descubrieron que podían hacer que los ratones dejasen de comer activando pequeños grupos de neuronas situados en los núcleos cerebelosos profundos anteriores (NCPa). Intrigados, se pusieron en contacto con colegas de la Escuela de Medicina de Harvard. Allí habían recopilado datos obtenidos mediante resonancia magnética funcional que comparaban la actividad cerebral de 14 personas aquejadas por el síndrome de Prader-Willi con otras tantas no afectadas mientras veían imágenes de comida, justo después de haber comido o tras permanecer en ayunas al menos cuatro horas.



JASPER CHAMBER/ISTOCK

Un nuevo análisis de los datos de las resonancias señaló que la actividad en las mismas regiones que el grupo de Chen había localizado en los ratones, los NCPa, parecía estar sustancialmente alterada en las personas con Prader-Willi. En las personas sanas, dichos núcleos respondían de forma más acusada a las imágenes de comida durante el ayuno que al acabar de comer, pero en las afectadas por el síndrome no se observaba tal diferencia. Del resultado se deduce que los NCPa deben participar en el control del apetito.

Otros experimentos en ratones, llevados a cabo por investigadores de otras instituciones, demuestran que la activación de las neuronas de los NCPa en los roedores reduce drásticamente la ingesta de alimento al atenuar la respuesta del centro de placer del cerebro al alimento. Los hallazgos se han detallado hace poco en *Nature*.

Durante años, los neurocientíficos que estudian el apetito se habían centrado sobre todo en el hipotálamo, región cerebral que interviene en la regulación del equilibrio energético, o en los centros de recompensa como el núcleo accumbens. Pero este grupo ha descubierto un nuevo centro del apetito en el encéfalo, según Elanor Hinton, neurocientífica de la Universidad de Bristol que no ha colaborado en el estudio. «Hace quince años que investigo el apetito y el cerebelo nunca había despertado mi interés. Creo que el descubrimiento va a ser importante, tanto para el síndrome de Prader-Willi como para abordar la obesidad en la población general», afirma.

Varios colegas de Chen se están planteando si sería posible manipular ese circuito en las personas sanas a través de una técnica no invasiva llamada estimulación magnética transcraneal. Si la idea culmina con éxito vislumbran un ensayo clínico en el futuro, adelanta Chen.

Diana Kwon

ENFERMEDADES INFECCIOSAS

DISTANCIAMIENTO SOCIAL EN LOS INSECTOS

Las abejas melíferas aíslan, a la vez que cuidan, a las compañeras infectadas

El ser humano no es la única especie que pone en práctica el distanciamiento de los demás para hacer frente a un patógeno mortal: un nuevo estudio indica que las abejas melíferas modifican el comportamiento y el uso del espacio para evitar la propagación del ácaro causante de la varroosis (*Varroa destructor*), que se alimenta de los órganos de su hospedadora y puede ser portador de virus funestos. Los autores observaron tales cambios en abejas silvestres y domesticadas infestadas por este ácaro, que constituye una de las mayores amenazas para este himenóptero en todo el mundo.

El equipo comprobó que, en las poblaciones silvestres infestadas, las pecoreadoras más veteranas practican en la periferia de la colmena sus danzas, con las que indican a las demás la ubicación de las fuentes de alimento. De esa forma pretenden evitar que las jóvenes nodrizas y las larvas ubicadas en el centro de la colmena caigan enfermas. Las abejas silvestres infestadas también se acicalan mutuamente con más intensidad en busca de parásitos en el centro de la colonia, cuando están entre las abejas



REDMOND DURRELL/ALAMY STOCK PHOTO

jóvenes, que son más valiosas. Los hallazgos se han descrito en *Science Advances*.

«Interpretamos este cambio en la organización social como una posible estrategia para limitar la diseminación del parásito en el enjambre», afirma la autora principal Michelina Pusceddu, investigadora de ciencias agrarias de la Universidad de Sassari.

Como preveían, las abejas domesticadas infestadas recibieron más acicalamiento que las sanas. Pero, en contra de lo esperado, las infestadas también entablaron más actividades de socialización, como la palpación con las antenas y el reparto de alimento regurgitado. Esto podría ser el reflejo de una solución de compromiso entre contener la propagación del parásito y mantener la comunicación, aclara la autora. «Probablemente el distanciamiento social es demasiado costoso a pequeña escala o dentro de la misma cohorte», señala Alberto Satta, otro de los autores del estudio, de la misma universidad.

El estudio ejemplifica cómo «hallar indicios de cambios de comportamiento complejos —como el fenómeno del distanciamiento social— para lidiar con las peculiares exigencias que supone vivir en un gran grupo social», opina Adam Dolezal, entomólogo de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, ajeno al estudio. La propia investigación de Dolezal ha demostrado que las abejas reducen el contacto con las compañeras infectadas por otro patógeno denominado virus israelí de la parálisis aguda, al que detectan mediante el olfato.

Las hormigas *Lasius niger*, las langostas, las aves y los primates no humanos también muestran conductas de alejamiento social. Pero en cualquier animal social, mantener las distancias tiene un coste.

Tanya Lewis

SALUD

DETECCIÓN DE INFECCIONES

Un sensor basado en un gel envía una alerta si se infecta una herida

Cuando las bacterias penetran en una herida, pueden amenazar nuestra salud o incluso nuestra vida si no las descubrimos a tiempo. Un nuevo sensor podría situarse entre los vendajes y enviar una alerta a un teléfono móvil cercano cuando la población bacteriana se adentre en terreno peligroso.

La piel humana sana está cubierta de bacterias que enseguida colonizan las heridas abiertas, como *Staphylococcus aureus* y *Escherichia coli*. Para evitar que esos microorganismos se propaguen por el cuerpo, lo que podría causar lesiones permanentes o incluso la muerte, es necesario limpiar la herida infectada y tratarla con antibióticos o (en los casos más extremos) amputar el miembro afectado. Los médicos determinan si existe infección examinando la herida o tomando una muestra y analizándola en el laboratorio. Pero eso obliga a retirar el vendaje, lo que puede retrasar la curación. Además, los exámenes visuales son subjetivos, los análisis de muestras llevan tiempo y en ambos casos es necesaria la presencia física del paciente.

Para resolver esos problemas, se han desarrollado dispositivos que se colocan bajo las vendas y controlan de forma ininterrumpida signos indirectos de la infección, como los cambios en la temperatura o la acidez de la herida. Ahora, los científicos de la Universidad Nacional de Singapur han creado un sensor de infecciones aún más directo.

El nuevo instrumento detecta una enzima llamada desoxirribonucleasa, o DNasa. Esta sustancia constituye un indicador fiable de la infección porque las bacterias patógenas la pro-

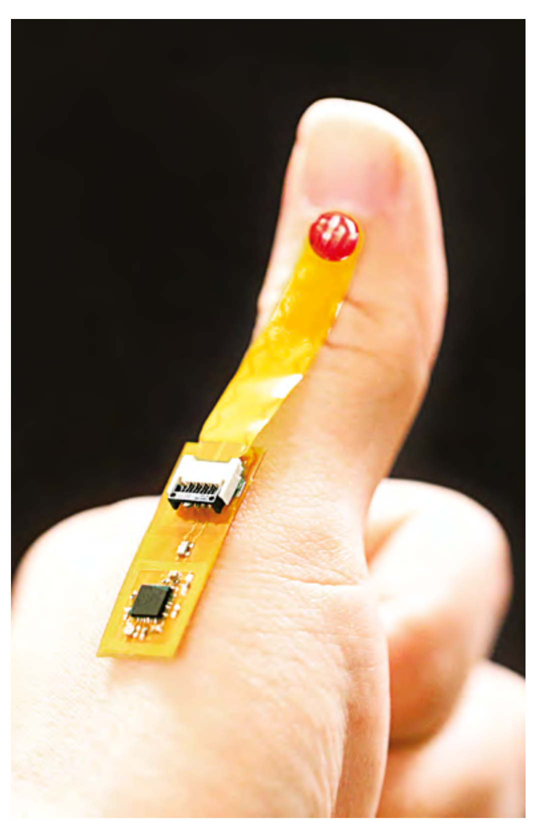
ducen en grandes cantidades en el interior de una herida, algo que no ocurre en la piel sana. Así pues, buscar esa enzima reduce la probabilidad de obtener falsos positivos. Además, la DNasa se acumula antes de que aparezcan otros signos de la infección. El nuevo sistema de alerta, bautizado como WINDOW (siglas inglesas de «detección inalámbrica de infecciones en heridas»), se presentó en un artículo publicado en *Science Advances*.

La detección de la enzima se basa en un material viscoso denominado hidrogel de ADN, formado por cadenas de ADN entrelazadas. Los investigadores desarrollaron un tipo concreto de hidrogel que se mantiene estable en entornos acuosos como el cuerpo humano, pero que empieza a descomponerse en presencia de la DNasa. Un chip conectado al gel detecta ese proceso y envía una señal a un teléfono móvil. La señal se transmite mediante un proceso inalámbrico y que no requiere baterías denominado comunicación de campo cercano (NFC, por sus siglas en inglés), el mismo que nos permite pagar acercando la tarjeta de crédito a un lector.

«Acoplando el hidrogel de ADN al chip, podemos crear un dispositivo sin pilas que cabe bajo el vendaje de una herida», explica el coautor del estudio John Ho, ingeniero eléctrico en la Universidad Nacional de Singapur. Las personas con heridas crónicas o que reciben el alta tras una operación podrían controlar su estado situando su teléfono junto al vendaje un par de veces al día. Si el aparato recibe una alerta de infección, enviaría un mensaje a un médico o le indicaría al paciente que acudiera al hospital para recibir antibióticos.

Se han probado otros métodos para detectar infecciones, como técnicas de imagen avanzadas para vigilar la proliferación bacteriana o «narices electrónicas» que perciben las señales químicas de una infección. «Hay muchas ideas que, en principio, han demostrado ser útiles», asegura June Mercer-Chalmers, directora de proyectos de la Universidad de Bath ajena al estudio, pero que participó en el desarrollo de una prueba ultrarrápida y barata para detectar infecciones tomando muestras con un hisopo.

Al final, según Mercer-Chalmers, todo se reduce a lo práctica que resulte una herramienta: si es asequible, requiere equipos complejos o debe superar barreras legales. Y subraya que el sistema WINDOW precisa componentes electrónicos y acceso a un teléfono inteligente, lo que podría ponerlo fuera del alcance de algunas personas y sistemas hospitalarios. Ho replica que los sensores WINDOW cuestan menos de 10 dólares y podrían fabricarse con métodos de producción ya existentes.


Un sensor inalámbrico detecta una enzima secretada en las infecciones.

El equipo de Ho ha expuesto el hidrogel de ADN a muestras de 18 personas con úlceras diabéticas del pie, algunas de ellas con infección por *S. aureus*, para determinar cuánto se degrada el material en presencia de la bacteria. Los investigadores también usaron el dispositivo en seis ratones de laboratorio con heridas expuestas a la misma bacteria, y detectaron las infecciones en menos de 24 horas, antes de que aparecieran signos físicos. Puesto que el sensor WINDOW aún se halla en una fase inicial, Ho pretende seguir realizando ensayos con grupos más amplios de pacientes y en heridas infectadas con otras bacterias. «En teoría», concluye, «debería funcionar con muchas otras cepas, puesto que poseen mecanismos similares de secreción de DNasa».

Sophie Bushwick

ZE XIONG

EL VIAJE DEL TELESCOPIO JAMES WEBB

El observatorio ya ha llegado a su destino, desde donde podrá bloquear la luz del Sol y de la Tierra

El observatorio espacial más ambicioso jamás construido está a punto de empezar a escudriñar el universo a través de sus ojos infrarrojos. Con un coste de 10.000 millones de dólares, el telescopio James Webb de la NASA verá más lejos en el espacio y más atrás en el tiempo de lo que nunca hayamos logrado, detectando objetos cuya luz se ha estirado hasta longitudes de onda más largas debido a la expansión del cosmos. Para captar esa tenue radiación, el telescopio debía alejarse de la contaminación lumínica y térmica de la Tierra. Así pues, ha recorrido 1,5 millones de kilómetros hasta el segundo punto de Lagrange (L2), un lugar del espacio donde las fuerzas gravitatorias de nuestro planeta y del Sol crean una posición orbital estable. Desde esa atalaya, el enorme escudo solar del James Webb podrá protegerlo a la vez de la radiación del Sol, la Tierra y la Luna, manteniendo el instrumento a una gélida temperatura de −223 grados Celsius. *Clara Moskowitz*

¿Qué son los puntos de Lagrange?

Propuestos en el siglo XVIII y llamados así en honor del matemático Joseph-Louis Lagrange, los 5 puntos de Lagrange del sistema Tierra-Sol son lugares donde un objeto pequeño puede orbitar en torno al Sol a la par que la Tierra.

Las líneas de contorno indican los lugares donde las fuerzas son más intensas (*líneas más próximas*) o más débiles (*más separadas*).

Los triángulos muestran las fuerzas que actuarían sobre un objeto.

L3 (punto de Lagrange 3)
Sol
L4
L1
L5
Tierra
Luna
Trayectoria del telescopio espacial James Webb
L2

El viaje a L2

Tras su despegue, el telescopio James Webb tardó tan solo tres días en cubrir una cuarta parte de su trayecto y alcanzar la órbita de la Luna. El pasado 24 de enero, al cabo de otros 27 días, llegó a L2 y comenzó a girar alrededor de ese punto.

Órbita en torno a L2

El observatorio girará en torno a L2, mientras ese punto orbita alrededor del Sol al mismo ritmo que la Tierra. El telescopio se ha sumado a la media docena de naves que han ocupado órbitas en L2 desde principios de siglo.

Las distancias y órbitas no están representadas a escala.

HEIDI B. HAMMEL/SHARI LIFSON/ASOCIACIÓN DE UNIVERSIDADES PARA LA INVESTIGACIÓN EN ASTRONOMÍA (*asesoramiento*); MATTHEW TWOMBLY (*gráfico*)



LA IMAGEN DEL MES

LOS PECULIARES CUERPOS FRUCTÍFEROS DE LOS MOHOS MUCILAGINOSOS

De escasos milímetros de altura, los esporocarpos de estos protistas lucen formas extrañas

Cuando el fotógrafo Barry Webb gatea por el bosque, busca algo que muchos no alcanzarían a ver sino con dificultad, pues apenas se alzan dos o tres milímetros del suelo: los cuerpos fructíferos de los mixomicetos. Para la ciencia, la clasificación de los mohos mucilaginosos, como también se los conoce, ha resultado ser un asunto tan escurridizo como su nombre, pues en el pasado han sido encuadrados en el reino de las plantas, de los hongos o incluso de los animales. Estos protistas habitan en superficies húmedas y a menudo en descomposición, como tocones de árboles, hojarasca o estiércol. Como acto postrero antes de morir, emiten los cuerpos fructíferos, o esporocarpos. Cuando estos se secan, se abren y el aire arrastra las esporas que quedan expuestas. En la imagen se aprecian los de la especie *Metatrichia floriformis*. Webb creó la imagen a partir de múltiples fotografías tomadas desde puntos de enfoque diferentes, lo que ofrece un resultado mucho más detallado del que sería posible con una sola instantánea.

Leslie Nemo

BARRY WEBB

ASTRONOMÍA

CHOQUES GALÁCTICOS

Aaron S. Evans y Lee Armus | Nuevos hallazgos sobre las colisiones de galaxias permiten anticipar el futuro de la Vía Láctea

ILUSTRACIÓN DE RON MILLER

Recreación de la futura fusión entre la Vía Láctea y Andrómeda vista desde Plutón, que podría verse arrojado junto con el sistema solar a las afueras de la galaxia.

En unos 5000 millones de años, cuando el Sol se expanda y se convierta en una gigante roja con un radio similar al de la órbita terrestre, nuestra galaxia chocará con su gran vecina más próxima, Andrómeda. A medida que la gravedad junte ambas galaxias, las estrellas se verán arrancadas de sus órbitas y formarán colas espectaculares, mientras el gas y el polvo se estiran hacia el núcleo del otro objeto. Con ello, desaparecerán los imponentes brazos espirales que han existido durante casi tres cuartas partes de la historia del universo.

Los centros de ambas galaxias terminarán fusionándose, y la ingente cantidad de gas que caerá hacia allí desatará una explosión de formación estelar, que producirá estrellas a un ritmo más de cien veces superior al que presenta hoy cualquiera de las dos galaxias. Ese gas también alimentará los ahora tranquilos agujeros negros supermasivos que albergan las galaxias en sus centros. Dichos agujeros crecerán, liberando una tormenta de partículas energéticas y radiación que eclipsará el brillo conjunto de todas las estrellas de ambas galaxias, y caerán en espiral el uno sobre el otro. Tras otros cien millones de años, ambos acabarán por fundirse en un único agujero, en un cataclismo que enviará ondas gravitacionales a través del espacio.

Pese a su espectacularidad, este proceso (que hoy ocurre en otros lugares y era aún más frecuente en el universo primitivo) no es una «colisión» propiamente dicha. Y es que las galaxias son en su mayor parte espacio vacío: los aproximadamente 300.000 millones de estrellas de una galaxia como la Vía Láctea están separadas, en promedio, por unos cinco años luz. La densidad del aire al nivel del mar es casi 100.000 billones de veces mayor que la densidad media del gas en el medio interestelar. En otras palabras, aunque una fusión constituye un suceso transformador en la vida de una galaxia y una inmensa fuente de energía, la mayoría de las estrellas de ambos cuerpos simplemente pasan cerca sin tocarse.

Aun así, los choques de galaxias son fascinantes y trascendentes. Estudiando estos episodios en otras galaxias podemos visualizar el futuro de la nuestra. Tales investigaciones también nos ayudan a comprender la historia del universo, ya que las colisiones galácticas eran mucho más frecuentes cuando el cosmos era más joven y denso. Las simulaciones sugieren que, en los últimos 10.000 millones de años, la Vía Láctea habría sufrido hasta cinco colisiones importantes que contribuyeron a convertirla en la galaxia espiral que es hoy.

Es un momento emocionante para llevar a cabo este trabajo. Hasta hace poco, los astrónomos carecían de las herramientas necesarias para medir y modelizar con detalle las colisiones galácticas. En estos eventos, la mayor parte de la acción transcurre tras gruesas capas de polvo difíciles de atravesar en longitudes de onda visibles, incluso con los telescopios más potentes. Con los nuevos instrumentos instalados en telescopios ya operativos y en otros previstos, empezaremos a responder algunas grandes preguntas acerca de las fusiones de galaxias, por ejemplo cómo surgen las estrellas en el caos de la colisión o cómo afecta la radiación liberada por los cada vez mayores agujeros negros centrales (que acabarán fusionándose) a la nueva galaxia que cobra forma en torno a ellos.

Choques galácticos

Ha pasado casi un siglo desde que Edwin Hubble descubriera que muchos de los objetos difusos visibles en el cielo —conocidos por entonces como «nebulosas»— no pertenecían a

EN SÍNTESIS

Estudiar las colisiones de galaxias nos ayuda a entender la historia del cosmos y a visualizar el futuro de la Vía Láctea, que acabará chocando con su galaxia vecina Andrómeda.

Esas fusiones, que pueden detectarse gracias a su intensa emisión infrarroja, provocan brotes de formación estelar y alimentan los agujeros negros supermasivos del centro de las galaxias.

Los científicos buscan comprender mejor tales procesos y sus efectos sobre la evolución de la galaxia recién formada por medio de observaciones detalladas y simulaciones de alta resolución.

la Vía Láctea, sino que eran «universos isla» independientes. Hubble clasificó estas nebulosas extragalácticas en tres grupos: aquellas con forma esférica o elíptica (galaxias elípticas); las que presentaban discos planos y a veces barrados, con una protuberancia central (galaxias espirales, como la nuestra), y otras extravagantes y deformes (galaxias irregulares).

Una pequeña fracción de las galaxias irregulares resultaron ser en realidad parejas o pequeños grupos de galaxias muy distorsionadas. En los años que siguieron al descubrimiento de Hubble, pioneros como Boris Vorontsov-Veliamínov, de la Universidad de Moscú, Fritz Zwicky, del Instituto de Tecnología de California (Caltech), y Halton Arp, de los observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar, estudiaron en detalle este tipo de «galaxias interconectadas». Las imágenes de larga exposición publicadas en 1966 en el *Atlas de galaxias peculiares* de Arp, obtenidas con placas fotográficas, muestran a las claras las formas distorsionadas que hoy reconocemos como distintivas de una colisión de galaxias.

En la década de 1970, los hermanos Juri y Alar Toomre utilizaron ordenadores para modelizar la interacción entre dos sencillas galaxias de disco con órbitas parabólicas. Así lograron recrear las formas de diversas galaxias peculiares y, en concreto, las extensas colas de estrellas arrojadas a grandes distancias durante la fusión. Estas y otras simulaciones pioneras mostraron que las extrañas y a veces espectaculares características señaladas por Arp y otros astrónomos podían explicarse meramente a partir de la interacción gravitatoria. Empleando ordenadores modernos y simulaciones punteras, los equipos liderados por Joshua E. Barnes, de la Universidad de Hawái, Lars Hernquist, de la Universidad Harvard, y Philip Fajardo Hopkins, de Caltech, han seguido desvelando la diversidad de las interacciones galácticas y la importancia de las fusiones en la vida de las galaxias.

En 1983 se lanzó el Satélite Astronómico de Infrarrojos (IRAS, por sus siglas en inglés). Este instrumento generó el primer mapa de todo el cielo en el infrarrojo lejano, lo que dio un enorme impulso al estudio del universo oculto y de las fusiones de galaxias. A las longitudes de onda en que operaba, IRAS era sensible a la emisión térmica del polvo templado y frío. La presencia de polvo interestelar en las galaxias casi siempre responde a la existencia de regiones de formación estelar. En las galaxias ordinarias, las estrellas nacen en nubes compuestas sobre todo de hidrógeno molecular gaseoso y polvo. A medida que las estrellas evolucionan y mueren, liberan elementos pesados como el carbono y el oxígeno, producidos

La secuencia de una fusión

Llegará un día en que la gravedad junte a la Vía Láctea con su galaxia espiral vecina, Andrómeda. La colisión durará varios miles de millones de años y no afectará a la mayoría de estrellas y planetas de ambas galaxias, dado que esos objetos están demasiado diseminados como para entrar en contacto entre ellos. Sin embargo, sí se verán arrojados a otros lugares de los dos cuerpos que se fusionan. Esta secuencia de imágenes obtenidas mediante una simulación informática muestra cómo podrían desarrollarse los acontecimientos. La simulación, creada a partir de observaciones del movimiento de Andrómeda realizadas con el telescopio espacial Hubble, revela que el resultado final del choque no será una galaxia espiral, sino una galaxia elíptica oblonga.

Dentro de 3750 millones de años

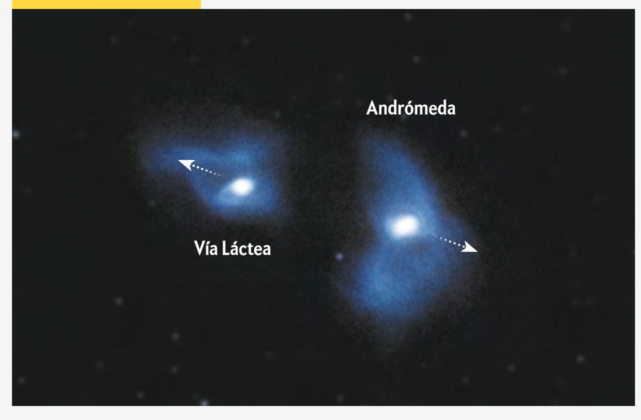


3875 millones de años



NASA, ESA, FRANK SUMMERS E INSTITUTO DE CIENCIA DEL TELESCOPIO ESPACIAL (*visualización*); NASA, ESA, GURTINA BESLA, UNIVERSIDAD DE COLUMBIA, ROELAND VAN DER MAREL E INSTITUTO DE CIENCIA DEL TELESCOPIO ESPACIAL (*simulación*)

4000 millones de años



4125 millones de años



4250 millones de años



4375 millones de años



en su interior por medio de la fusión nuclear. Y esos elementos generan polvo que enriquece aún más las nubes circundantes. (El polvo preexistente se originó en episodios previos de formación estelar.) En las galaxias en colisión, ese proceso se retroalimenta: la fusión concentra el gas y el polvo en regiones compactas, dando lugar a brotes de formación estelar que, a su vez, producen más elementos pesados y más polvo. Como resultado, aunque las estrellas jóvenes y masivas liberan la mayor parte de su energía en longitudes de onda ultravioletas, muy poca de esa radiación llega a la Tierra: los granos de polvo que hay en torno a las estrellas la absorben y la reemiten en el infrarrojo. Los telescopios con detectores infrarrojos sensibles pueden medir esa radiación, permitiéndonos atisbar a través del velo de polvo y explorar los estadios iniciales de la formación estelar y el crecimiento de los agujeros negros supermasivos.

IRAS detectó muchos de esos viveros de estrellas en la Vía Láctea y en miles de otras galaxias, mejorando sustancialmente dos aspectos clave de nuestra comprensión de las colisiones galácticas. Por un lado, IRAS aportó medidas precisas de la energía generada en el interior de las galaxias que se fusionan y mostró que están entre los objetos con mayor luminosidad intrínseca del universo. Además, el satélite detectó choques galácticos a enormes distancias (únicamente a partir de su emisión infrarroja) y proporcionó así el primer censo preciso de fusiones en escalas de tiempo cósmicas. Algunas de ellas se producían tan lejos de la Tierra que la luz recibida se emitió cuando el universo tenía apenas una quinta parte de su edad actual. Ciertas fusiones liberan más del 90 por ciento de la energía en el infrarrojo lejano, por lo que su verdadera naturaleza está vedada a los telescopios ópticos.

Pero IRAS demostró que la detección de un gran «exceso» de radiación infrarroja es una excelente forma de encontrar galaxias que chocan o interactúan. En concreto, descubrió las llamadas galaxias luminosas en el infrarrojo, o LIRG, por sus siglas en inglés. Estos objetos, cuya luminosidad en el infrarrojo lejano es más de 100.000 millones

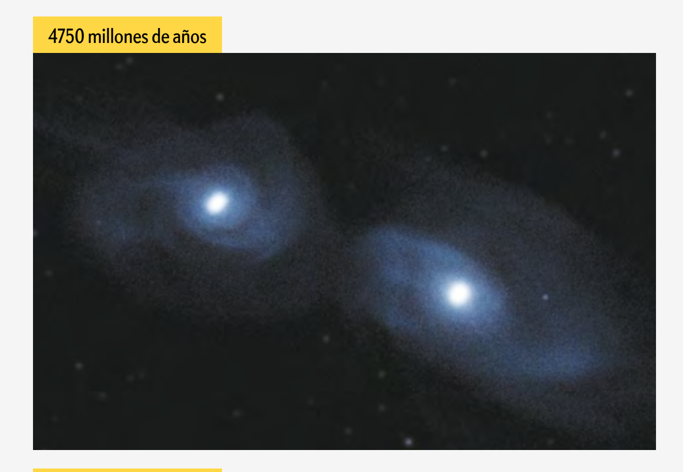
4500 millones de años



4625 millones de años



4750 millones de años



4875 millones de años



de veces el brillo del Sol (unas tres veces la energía total liberada por el conjunto de estrellas de la Vía Láctea), a menudo son galaxias que se están fusionando. Aún más infrecuentes y espectaculares son las galaxias ultraluminosas en el infrarrojo (ULIRG), con luminosidades en el infrarrojo lejano más de un billón de veces superiores al brillo del Sol y que casi siempre corresponden a violentas colisiones galácticas.

A finales de los ochenta, los científicos dieron un paso para explicar qué ocurre en el interior de dos galaxias que colisionan, cuando relacionaron las fusiones con otro tipo de objetos astrofísicos llamados cuásares. Impulsados por agujeros negros supermasivos activos, los cuásares son las fuentes más energéticas del universo, con un brillo más de un billón de veces mayor que el del Sol. David Sanders, que a la sazón trabajaba como investigador posdoctoral en Caltech con Tom Soifer y el difunto Gerry Neugebauer, postuló que las ULIRG constituían una fase temprana y envuelta en polvo de los cuásares formados durante la colisión. Esa conexión evolutiva entre las ULIRG y los cuásares pudo establecerse gracias a estudios previos de Alan Stockton, de la Universidad de Hawái, John MacKenty, del Instituto de Ciencia del Telescopio Espacial, y Timothy Heckman, de la Universidad Johns Hopkins. Estos científicos mostraron que las galaxias que albergaban un agujero negro central activo a menudo aparecían distorsionadas, lo cual era compatible con que estuvieran fusionándose.

El vínculo propuesto entre las ULIRG y los cuásares, dos tipos de objetos en apariencia muy diferentes, aportó un modelo verificable que impulsó este tipo de investigaciones. Al ofrecer un marco para relacionar galaxias luminosas en el infrarrojo, potentes brotes estelares, y galaxias activas y cuásares, el modelo ayudó a renovar el interés por entender cómo afectan las fusiones galácticas a la evolución de las galaxias en escalas de tiempo cósmicas. Dado que el polvo convierte en radiación infrarroja más de la mitad de la luz que han generado las estrellas en toda la historia del universo, el papel de las fusiones galácticas podría resultar crucial.

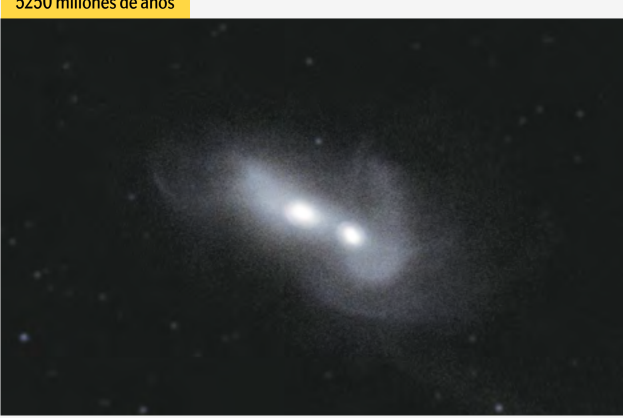
5000 millones de años



5125 millones de años



5250 millones de años



5375 millones de años



Un proyecto ambicioso

En 2004, pusimos en marcha junto a nuestros colaboradores el Estudio de LIRG en Todo el Cielo con Grandes Observatorios (GOALS, por sus siglas en inglés), con el objetivo de obtener imágenes y datos espectroscópicos de fusiones galácticas usando tres grandes observatorios de la NASA: el telescopio espacial Spitzer, el telescopio espacial Hubble y el observatorio de rayos X Chandra. Estos instrumentos proporcionan una visión en múltiples longitudes de onda del ciclo de vida de las galaxias en colisión. La muestra que estudia GOALS comprende las galaxias infrarrojas más brillantes de nuestro universo local. Esa colección de más de doscientos objetos, todos ellos a menos de 1300 millones de años luz de la Tierra, ha permitido realizar el estudio más detallado hasta la fecha de las LIRG.

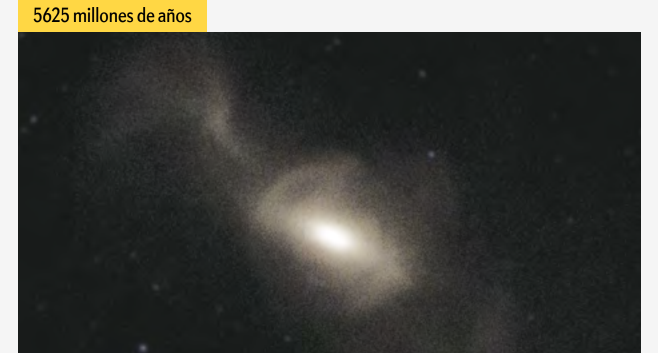
Nuestro equipo también emplea telescopios terrestres, como la Red Muy Grande (VLA) en Nuevo México; el telescopio Hale de 5,08 metros en Monte Palomar, California; los telescopios gemelos Keck de 10 metros en Hawái, y el Gran Conjunto Milimétrico/Submilimétrico de Atacama (ALMA) en Chile. También hemos obtenido datos con el observatorio infrarrojo Herschel de la Agencia Espacial Europea y el telescopio NuSTAR de la NASA, que estudia rayos X de muy alta energía.

GOALS ya ha ampliado notablemente nuestros conocimientos sobre las galaxias que colisionan. Por ejemplo, una pregunta persistente era si la luz que nos llega de esas galaxias procede en su mayor parte de las estrellas jóvenes o de los agujeros negros activos. Una forma de separar sus contribuciones respectivas en los diferentes estadios de la colisión es estudiar los perfiles de energía (la cantidad de energía emitida en función de la longitud de onda) de ambos tipos de objetos. Las estrellas son fuentes térmicas de radiación: su emisión energética se concentra en torno a una cierta longitud de onda que depende de la temperatura, y disminuye muy deprisa para longitudes de onda más cortas o más largas. Por su parte, el disco de acreción que alimenta un agujero negro es visco-

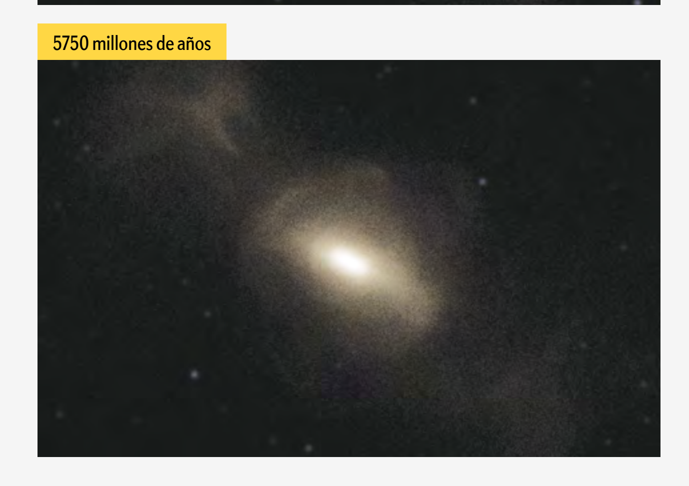
5500 millones de años



5625 millones de años



5750 millones de años



so y caliente, y su temperatura aumenta conforme nos acercamos al horizonte de sucesos desde el exterior. Eso hace que los discos de acreción presenten perfiles de energía mucho más anchos que los de las estrellas y produzcan una fracción mucho mayor de radiación de alta energía. Además, pueden calentar e ionizar (arrancar electrones) toda una serie de elementos presentes en el gas circundante. Hallar en el espectro de una galaxia fuertes emisiones provenientes de elementos altamente ionizados es una prueba fehaciente de que en su centro hay un agujero negro supermasivo que engulle materia.

De acuerdo con los resultados de GOALS, los brotes de formación estelar son una fuente de energía más importante que los agujeros negros si nos fijamos en todo el conjunto de LIRG. En torno a una quinta parte de las galaxias luminosas en el infrarrojo que estudió GOALS parecen albergar agujeros negros supermasivos activos, aunque incluso en esas galaxias las estrellas aportan una cantidad considerable de energía. Pero quizás estamos pasando por alto agujeros negros activos tan ocultos por el polvo que no son detectables ni siquiera con análisis infrarrojos. Esa posibilidad está siendo estudiada por dos miembros del equipo de GOALS, George Privon, del Observatorio Nacional de Radioastronomía de EE.UU., y Claudio Ricci, de la Universidad Diego Portales de Santiago de Chile, así como por un equipo de la Universidad de Tecnología Chalmers de Gotemburgo liderado por Susanne Aalto.

Además, solemos identificar los agujeros negros activos durante las últimas etapas de la fusión. Eso sugiere que gran parte del crecimiento de los agujeros negros supermasivos puede ocurrir con retraso respecto a la formación estelar, lo que daría a los brotes estelares más tiempo para contribuir a la energía total. También podría ser que algunos agujeros negros crecieran de forma temprana, como parecen indicar las observaciones de alta resolución de algunas LIRG que ha realizado Anne Medling, investigadora de la Universidad de Toledo (Ohio) y miembro del equipo de GOALS. Muchas investigaciones actuales tratan de precisar las escalas de tiempo en las que crecen las estrellas y el agujero negro supermasivo central dentro de una galaxia. Esos trabajos buscan comprender uno de los misterios más profundos de las dos últimas décadas: por qué, en las galaxias espirales y elípticas actuales, las masas del agujero negro central y de las estrellas del bulbo se hallan en una proporción casi constante y cercana a 1/1000.

Nuevas ideas

Otros proyectos recientes han arrojado luz sobre las LIRG y la formación estelar en las co-

lisiones de galaxias. Por ejemplo, un equipo en el que participaron los miembros de GOALS Kirsten Larson, del Instituto de Ciencia del Telescopio Espacial, Tanio Díaz Santos, de la Fundación para la Investigación y la Tecnología Hellas de Creta, y Loreto Barcos Muñoz y Yiqing Song, ambas de la Universidad de Virginia, cartografió el gas calentado por las estrellas más masivas de las LIRG y halló que la mayor parte de la formación estelar ocurre en regiones muy compactas y energéticas. Esas zonas presentan tasas de formación estelar y densidades de gas diez o más veces superiores a las que observamos en las galaxias ordinarias. En los estadios tempranos de la colisión, las regiones de formación estelar más activas tienden a situarse fuera de los núcleos de las LIRG. Sin embargo, con el tiempo, los principales brotes de formación estelar van concentrándose en zonas compactas dentro y alrededor de los núcleos que se fusionan, a medida que el gas de los brazos espirales cae hacia el centro.

En las últimas etapas de las fusiones más energéticas, la densidad de las concentraciones centrales de gas molecular es tan alta que comienzan a parecerse a nubes moleculares gigantes. Un buen ejemplo de este fenómeno es la galaxia ULIRG más cercana, Arp 220, situada a 250 millones de años luz de la Tierra. Kazushi Sakamoto, de la Academia Sínica de Taiwán, y Nick Scoville, de Caltech, han trazado un mapa muy detallado de las nubes de gas presentes en el centro de este objeto usando el observatorio ALMA. Con ello, demostraron que Arp 220 contiene tanto gas molecular como varias vías lácteas, concentrado en una región con un diámetro inferior a 3000 años luz (unas veinte veces menor que el del disco gaseoso de nuestra galaxia).

Aunque las fusiones de galaxias son potentes fábricas de estrellas, los cúmulos estelares formados durante la colisión pueden tener vidas sorprendentemente cortas. A partir de datos del telescopio espacial Hubble, Angela Adamo, de la Universidad de Estocolmo, y el miembro de GOALS Sean Linden, de la Universidad de Massachusetts en Amherst, han observado una drástica reducción del número de cúmulos conforme aumenta su edad. Eso indica que, en las galaxias que se fusionan, muchos cúmulos estelares se destruyen al poco de formarse. La colisión potencia la formación estelar, pero las fuerzas de marea y los vientos generados por las supernovas que estallan en el interior de los cúmulos pueden destrozarlos con suma facilidad.

En los últimos 10.000 millones de años, la Vía Láctea habría sufrido hasta cinco colisiones importantes

Al igual que la evolución de las estrellas puede barrer el gas de los cúmulos, las galaxias que colisionan también pueden sufrir los efectos de las supernovas y los agujeros negros centrales, algo que tiene profundas repercusiones en la evolución galáctica ulterior. Los grandes flujos de gas ionizado que emergen de las galaxias en colisión se estudiaron por primera vez a principios de los noventa, cuando Heckman y sus colaboradores encontraron indicios de potentes «supervientos» en algunas LIRG y ULIRG con pequeños desplazamientos al rojo. Los estudios posteriores de ese gas atómico caliente han hallado que los vientos no solo son habituales en las LIRG y ULIRG, sino que los más rápidos pueden abandonar la galaxia y expulsar gas al espacio intergaláctico, como demostró un equipo liderado por David Rupke, del Colegio Rhodes. A escalas más pequeñas, los chorros y burbujas de gas caliente señalan las regiones donde los núcleos transfieren energía a la galaxia e impulsan los flujos, tal y como mostraron Medling y Vivian U, investigadora de GOALS en la Universidad de California en Irvine, usando los telescopios gemelos Keck.

Los supervientos galácticos son multifase, lo que significa que pueden contener gas atómico y molecular caliente y frío. Algunos astrónomos, entre ellos Sakamoto, Barcos Muñoz, Miguel Pereira Santaella, del Centro de Astrobiología en Madrid, y Eduardo González Alfonso, de la Universidad de Alcalá de Henares, han estudiado el denso gas molecular de los supervientos y han descubierto que a menudo emergen

grandes cantidades de gas frío de las galaxias en colisión. Esos flujos pueden extenderse a distancias de 10.000 años luz y a veces transportan más gas que el que se transforma en estrellas en el núcleo, privando así a la galaxia de combustible para la formación estelar. E igual de importante es que los vientos pueden enviar elementos pesados (metales) y polvo al espacio intergaláctico. En casi todos los casos, esos flujos parecen originarse cerca del núcleo de la fusión, debido al efecto combinado de las supernovas, la presión de radiación y los chorros (rápidas columnas de gas) procedentes del agujero negro central. Los flujos podrían ser importantes en el ciclo de vida de las galaxias, dado que las detalladas simulaciones de Chris Hayward, del Instituto Flatiron, muestran que la retroalimentación estelar puede regular la formación de estrellas y producir los vientos al mismo tiempo.

Grandes telescopios

El telescopio espacial James Webb está en condiciones de mejorar notablemente nuestra comprensión de las fusiones de galaxias. Este observatorio infrarrojo de 6,5 metros de diámetro despegó a finales de 2021 y es el sucesor de IRAS, lanzado en la década de 1990, y Spitzer, que concluyó su vida útil en 2020. Pero el telescopio Webb será al menos cincuenta veces más sensible que Spitzer y tendrá casi diez veces su resolución espacial, por lo que producirá imágenes nítidas de galaxias en el infrarrojo cercano y medio. También llevará a bordo instrumentos capaces de generar cientos de espectros a la vez. Eso le permitirá estudiar con gran detalle las regiones de formación estelar y las que rodean los agujeros negros supermasivos en las fusiones de galaxias cercanas.

La colaboración GOALS observará cuatro LIRG cercanas como parte de un programa del telescopio James Webb para la publicación temprana de datos. Otros investigadores emplearán el observatorio para estudiar galaxias activas cercanas, cuásares distantes y campos profundos sin fuentes brillantes en busca de las galaxias más tempranas del universo. Los objetivos de GOALS en el marco de este programa incluyen galaxias con potentes brotes de formación estelar y agujeros negros centrales activos. Todas ellas están inmersas en una fusión y muestran flujos galácticos, y serán laboratorios muy útiles para entender cómo se desarrollaron esos procesos en el universo primitivo. Más allá del programa de publicación temprana de datos, en el primer ciclo de observaciones generales del telescopio Webb habrá varios proyectos que examinarán aspectos de las LIRG como la retroalimentación de los cúmulos jóvenes y los agujeros negros activos, el porcentaje de formación estelar que no podemos detectar en longitudes de onda visibles o la naturaleza de los núcleos ocultos.

La Red Muy Grande de Próxima Generación (ngVLA) sustituirá a la instalación actual de 27 antenas. Este nuevo interferómetro en longitudes de onda de radio y milimétricas tendrá 263 antenas y observará las regiones de formación estelar, los agujeros negros activos y la luz asociada a explosiones estelares con una sensibilidad y resolución diez veces mayores que las de la actual VLA.

En resumen, los nuevos telescopios desvelarán la astrofísica de las fusiones galácticas, tanto cercanas como del universo primitivo. Las simulaciones de alta resolución, en combinación con esas observaciones detalladas, serán clave para comprender los procesos físicos de retroalimentación que ayudan a regular la formación estelar y el crecimiento de los agujeros negros en las colisiones galácticas. Otros futuros observatorios, ya previstos o propuestos, podrán detectar los polvorientos núcleos de las galaxias en formación y las ondas gravitacionales generadas en los choques de agujeros negros supermasivos a lo largo de casi todo el tiempo cósmico. A medida que vayamos descubriendo más objetos exóticos en los confines del universo, seguiremos usando estas nuevas herramientas para entender mejor cómo nacen y viven sus vidas las galaxias.

Aaron S. Evans es profesor de astronomía en la Universidad de Virginia y astrónomo del Observatorio Nacional de Radioastronomía de EE.UU. y del Centro de Ciencia de ALMA en América del Norte.



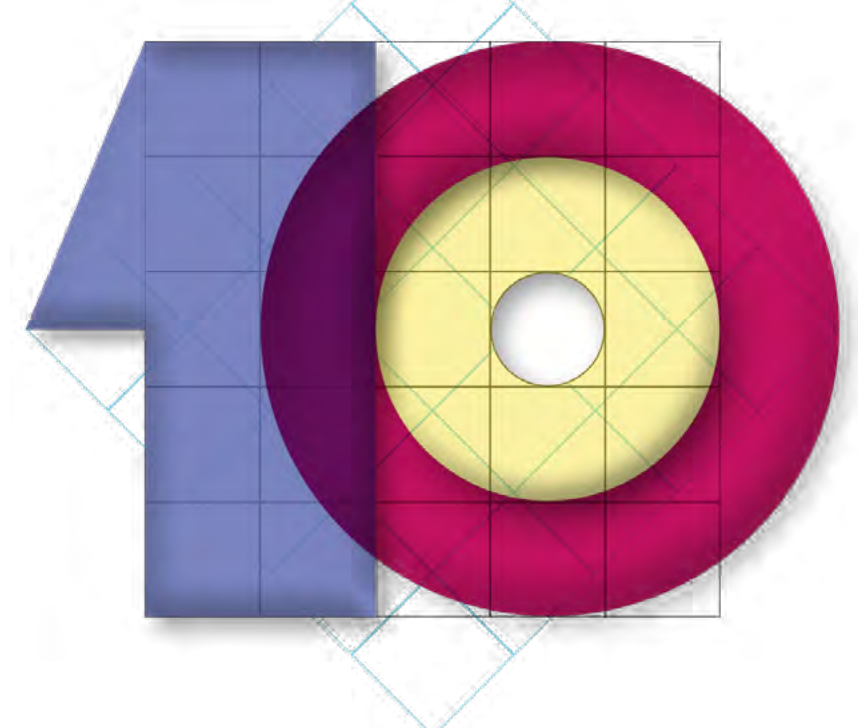
Lee Armus es científico sénior del Centro de Procesamiento y Análisis Infrarrojo de la NASA e investigador del Instituto de Tecnología de California.



EN NUESTRO ARCHIVO

Colisiones entre galaxias. Joshua Barnes, Lars Hernquist y François Schweizer en *IyC*, octubre de 1991.

Galaxias en colisión. Lourdes Verdes-Montenegro en *IyC*, marzo de 2004.



INFORME ESPECIAL

LAS 10 TÉCNICAS EMERGENTES MÁS PROMETEDORAS DEL MOMENTO

Innovaciones que ayudarán a afrontar los retos relacionados con la salud, las comunicaciones y el cambio climático

ILUSTRACIONES DE VANESSA BRANCHI

Pensemos en los enormes desafíos a los que se enfrenta el planeta: gestionar el cambio climático, reducir el consumo energético, mantener la producción de alimentos o mejorar la salud mundial. Muchos de esos retos conllevan problemas que se solapan, lo que abre la puerta a hallar soluciones interrelacionadas. Así pues, no es de extrañar que las Naciones Unidas hayan designado las «alianzas» como su 17.º Objetivo de Desarrollo Sostenible.

Esa interrelación ocupa un lugar central en esta décima edición de «Las 10 técnicas emergentes más prometedoras del momento», preparada por *Scientific American* y el Foro Económico Mundial. A medida que Gobiernos e industrias aceleran sus compromisos con la



descarbonización, presenciaremos una serie de enfoques novedosos en cuanto a medios de transporte con bajas emisiones, infraestructuras residenciales y comerciales o procesos industriales. Dos de esas técnicas, la obtención de amoníaco «verde» y los cultivos diseñados para producir su propio fertilizante, mejorarán la sostenibilidad agrícola. En áreas remotas, la impresión 3D con materiales autóctonos permitirá construir casas más resistentes sin gastar tanta energía.

La salud está en la mente de todos, así que la lista de este año subraya el auge de los sensores para detectar la COVID-19 y otras enfermedades a través del aliento, así como de los dispositivos inalámbricos para medir biomarcadores que facilitan el diagnóstico y la vigilancia de enfermedades crónicas. Nuevos resultados en el campo de la genómica podrían permitirnos aumentar la «duración de la salud», y la fabricación de fármacos a la carta dará lugar a medicamentos personalizados, a la vez que ayuda a solucionar los actuales problemas de suministro asociados a la producción a gran escala.

Para tenerlo todo bajo control, crece con rapidez el número de dispositivos que conforman la Internet de las cosas. Esos aparatos se conectarán de manera más global gracias a los nanosatélites en órbita y obtendrán su energía a partir de señales inalámbricas. El futuro nunca había estado tan interconectado.

Mariette DiChristina y Bernard S. Meyerson

CAMBIO CLIMÁTICO

AUMENTO DE LA DESCARBONIZACIÓN

Bernard S. Meyerson | Los grandes compromisos para abordar el cambio climático darán pie a nuevas técnicas

Más de un siglo después de que se postulara por primera vez que el dióxido de carbono atmosférico podía atrapar el calor, y décadas después de que el «cambio climático» irrumpiera en el lenguaje cotidiano, las naciones e industrias han asumido nuevos compromisos para disminuir su huella de carbono. En 2021, Estados Unidos, el segundo país con más emisiones de carbono, se comprometió a rebajarlas a la mitad de los niveles de 2005 antes del final de 2030. Para esa misma fecha, el Reino Unido ha anunciado una ambiciosa reducción del 68 por ciento respecto a las emisiones de 1990. Y el Parlamento Europeo ha aprobado una ley que exigirá, también para 2030, recortes de al menos un 55 por ciento en relación con los niveles de 1990. Si bien algunos sectores como la industria petrolera o la aviación se muestran más reacios al cambio, desde 2015 se ha duplicado el ritmo al que las empresas se suman a la iniciativa Objetivos Basados en la Ciencia, que les ayuda a rebajar sus emisiones para cumplir con los acuerdos de París. Y el año pasado General Motors, Volkswagen y otros grandes fabricantes de automóviles establecieron exigentes objetivos de descarbonización.

Esa aceleración de los compromisos (y de los desafíos asociados) es un claro indicador del advenimiento de la descarbonización en todo el mundo. Y obligará a que «emerjan» diversas técnicas, es decir, a que demuestren su capacidad para funcionar a gran escala en un plazo de tres a cinco años. Para que eso suceda, las soluciones ya identificadas deben madurar y extender su ámbito de aplicación más deprisa. Las lagunas tecnológicas existentes requerirán una innovación constante, y cabe esperar que varias áreas generales reciban una atención considerable y experimenten un gran crecimiento.



Aún no hay más de un 2 por ciento de vehículos rodados privados y comerciales que no generen emisiones, pese al notorio interés inicial que suscitó Tesla entre los consumidores. Ya se han ideado soluciones para reducir las emisiones en el transporte ferroviario y marítimo de mercancías, pero muchas de ellas (como el Coradia iLint, un tren de pasajeros impulsado por pilas de combustible de hidrógeno y fabricado por Alstom) todavía no se han aplicado a gran escala. Las barreras no son solo técnicas, sino también políticas, dado que estos proyectos transformadores requieren grandes inversiones.

Se calcula que el 13 por ciento de todas las emisiones de carbono de Estados Unidos proceden del combustible empleado en las calefacciones y cocinas de edificios residenciales y comerciales. Para reducir esa cifra tanto en EE.UU. como en el resto del mundo, hará falta que la climatización alcance las cero emisiones netas y que se generalice el uso de sistemas solares pasivos. Asimismo, será importante utilizar materiales de construcción de origen natural, como la madera sostenible y el cemento con baja huella de carbono.

Conforme vayan extendiéndose las energías renovables, habrá que emplearlas para descarbonizar las principales fuentes de gases de efecto invernadero. Un ejemplo es el hidrógeno «verde», producido sin usar combustibles fósiles, que podría convertirse en un combustible no contaminante y servir como materia prima sin huella de carbono en la industria química. De igual modo, las emisiones asociadas a los centros de datos, que a menudo consumen megavatios de electricidad, disminuirán drásticamente si los ubicamos junto a las fuentes de energía renovable.

Cumplir con los objetivos de generación de energía fijados por las naciones e industrias exigirá una expansión radical de las tecnologías con cero emisiones, como la fotovoltaica, eólica, hidroeléctrica, mareomotriz y nuclear. Sin embargo, persisten varios obstáculos cruciales: el almacenamiento fiable, eficiente y económico de energía a escala industrial se halla en una fase incipiente. Tampoco se ha logrado todavía una energía nuclear de fisión libre de emisiones (incluida la eliminación de residuos) que sea segura y asequible. Y para reducir el impacto de la generación de electricidad a partir de combustibles fósiles habrá que desarrollar otras muchas técnicas que capturen, reutilicen y secuestren el carbono.

En el sector primario, las alternativas a la carne que proponen empresas como Impossible Foods y Beyond Meat tendrán que alcan-

zar una mayor cuota de mercado para mitigar los ingentes niveles de carbono y metano que genera la ganadería. Los datos recogidos mediante sensores conectados a la Internet de las cosas permitirán optimizar cada vez más la gestión de la tierra y los cultivos, así como el uso de agua y fertilizantes, lo que contribuirá a reducir aún más las emisiones de carbono.

Además de la miríada de desafíos técnicos que plantea una rápida descarbonización, las naciones deben establecer sistemas de gobernanza global que garanticen la igualdad energética. Las economías emergentes no pueden afrontar los mismos objetivos de reducción de emisiones, so pena de ver frenado su desarrollo. Asimismo, los países tendrán que asignar de manera juiciosa terrenos para ampliar las infraestructuras de las energías renovables. Y, con vistas a garantizar el cumplimiento de los acuerdos, los Gobiernos necesitarán un sistema global de vigilancia ambiental, similar a los protocolos del Organismo Internacional de Energía Atómica.

AGRICULTURA

CULTIVOS AUTOABONADOS

Wilfried Weber y Carlo Ratti | Plantas que producen su abono, en vez de obtenerlo del suelo

La disponibilidad de alimentos para la creciente población mundial depende sobre todo del uso de abonos nitrogenados industriales. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), se necesitan unos 110 millones de toneladas de nitrógeno para mantener la producción anual de los cultivos del planeta. Lo habitual es que los abonos nitrogenados se sinteticen por conversión de las moléculas de nitrógeno atmosférico en amoníaco, que las plantas sí son capaces de utilizar. Aproximadamente la mitad de la producción mundial de alimentos depende de esta transformación, que se estima que consume cerca del 1 por ciento de las necesidades energéticas básicas del planeta. Se trata de un proceso que gasta mucha energía y genera entre el 1 y el 2 por ciento de las emisiones globales de dióxido de carbono. Además, los abonos industriales son demasiado caros para los agricultores minifundistas de muchos países, lo que hace disminuir notablemente el rendimiento e incrementa la presión sobre los suelos.

En busca de una solución, los investigadores se han fijado en la estrategia que sigue la naturaleza para sintetizar sus abonos nitrogenados. Mientras que los cultivos alimentarios básicos, como el maíz y otros cereales, obtienen el nitrógeno inorgánico del suelo, las leguminosas, como la soja y las judías, han seguido un camino más ingenioso para generarlo por sí mismas. Su raíz interacciona con las bacterias del suelo, que acaban colonizándola y forman en ella órganos simbióticos denominados nódulos. La planta aporta los azúcares con los que se alimentan las bacterias y, al mismo tiempo, se aprovecha de la capacidad de estas para fijar el nitrógeno atmosférico, o sea, de convertirlo en amoníaco. Por tanto, gracias a una antigua simbiosis evolutiva con las bacterias del suelo, las leguminosas no dependen de abonos nitrogenados externos.

Los investigadores han demostrado que la formación de los nódulos (las fábricas naturales de abonos) implica una comunicación molecular estrecha entre las bacterias del suelo y las raíces de las leguminosas. Este conocimiento ha inspirado nuevas estrategias fascinantes para introducir de manera artificial la fijación del nitrógeno en las plantas que no son leguminosas. En una de ellas, se fuerza a las raíces de los cereales a que entablen una interacción simbiótica con las bacterias fijadoras de nitrógeno; se simula la comuni-



cación molecular entre las leguminosas y las bacterias para que estas últimas acaben colonizando las raíces. En otra estrategia, se enseña a las bacterias presentes en las raíces de los cereales, que no fijan nitrógeno, a producir nitrogenasa (la enzima clave que convierte el nitrógeno atmosférico en el amoníaco asimilable por las plantas).

Gracias a que los Gobiernos y las fundaciones privadas han dado recientemente un decidido apoyo a la investigación y desarrollo de la manipulación genética para la fijación del nitrógeno, los cultivos que saquen provecho de esta poderosa simbiosis pronto podrían convertirse en un elemento clave para que la producción de alimentos resulte más sostenible.

BIOQUÍMICA

SENSORES DEL ALIENTO PARA DIAGNOSTICAR ENFERMEDADES

Rona Chandrawati y Daniel E. Hurtado | Soplar es bastante más rápido que extraer sangre

Cuando la policía sospecha que un conductor va bebido, le hace soplar en un alcoholímetro, un dispositivo portátil que mide la concentración de alcohol en la sangre. ¿Se podría hacer lo mismo para diagnosticar enfermedades?

La respuesta corta es que sí. La respiración humana contiene más de 800 compuestos, y los últimos descubrimientos han revelado una fuerte correlación entre la concentración de algunos de ellos y diferentes estados patológicos. Por ejemplo, una cantidad muy elevada de acetona en el aliento es un indicador firme de dia-



betes sacarina; la exhalación de mucho óxido nítrico está correlacionada con la inflamación celular y, por lo tanto, puede utilizarse como biomarcador de enfermedades respiratorias; y un alto nivel de aldehídos guarda una estrecha relación con el cáncer de pulmón.

Cuando una persona sopla en un muestreador, su aliento alimenta un sensor que detecta los cambios en la resistencia eléctrica de unos semiconductores hechos de óxidos metálicos. En pocos minutos, el análisis con un programa informático en un ordenador externo genera la lista de compuestos hallados.

Además de ofrecer los resultados con mucha más rapidez que una extracción de sangre, los sensores para el aliento podrían simplificar el diagnóstico médico al proporcionar un modo no invasivo de obtener datos decisivos sobre la salud. Que sea fácil de usar, portátil y barato tiene muchas ventajas en los países de ingresos bajos y escasos recursos médicos. Los sensores también podrían mitigar la diseminación comunitaria de un virus, del mismo modo que se comprueba la fiebre antes de entrar en los espacios cerrados compartidos, como los supermercados o los restaurantes.

En marzo de 2020, Hossam Haick y sus colaboradores del Instituto Technion, en Israel, finalizaron un estudio clínico exploratorio en Wuhan para detectar la COVID-19 a través del aliento exhalado. Los sensores alcanzaron una exactitud notable, del 95 por ciento, y una sensibilidad del 100 por cien a la hora de diferenciar las personas que tenían o no la enfermedad. En 2021, el Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE.UU. aportó 3,8 millones de dólares para reconvertir el E-Nose de la NASA (un dispositivo de control que utiliza una técnica de matrices de nanosensores para, con total autonomía, rastrear el aire de la Estación Espacial Internacional en busca de sustancias que pudieran ser nocivas) en un detector de COVID-19.

Habrá que solventar ciertos problemas críticos antes de extender el uso de los sensores para el aliento. Primero, se necesita mejorar la exactitud de detección de algunas enfermedades, entre ellas la tuberculosis y el cáncer. Segundo, algunas muestras de aliento contienen compuestos que alteran el resultado de la prueba y crean falsos positivos. También se tendrán que mejorar los algoritmos que analizan los datos de los sensores para que sean más exactos. Por último, se debería aumentar la inversión en ensayos clínicos que permitan validar esta técnica con poblaciones de mayor tamaño.

INGENIERÍA

FABRICACIÓN DE FÁRMACOS A LA CARTA

Elisabeth O'Day y Mine Orlu | Elaboración de medicamentos donde y cuando se necesiten

Imaginemos que, la próxima vez que vayamos a la farmacia, el farmacéutico no se dedique a buscar por los pasillos el medicamento indicado en la receta, sino que lo fabricase totalmente personalizado con la dosis y la formulación exactas. Los recientes avances de la microfluídica y la elaboración de fármacos a la carta están preparados para que esta especulación se vuelva realidad.

Los medicamentos se vienen fabricando en grandes lotes a través de un proceso con multitud de etapas cuyas distintas partes se encuentran repartidas por todo el planeta. Cientos de toneladas de materiales están sujetos a tal producción en masa, por lo que garantizar constantemente la calidad y un suministro fiable supone un enorme reto. Pueden transcurrir meses entre la fabricación del fármaco y su venta.

En cambio, la elaboración de medicamentos a la carta, también conocida como fabricación farmacéutica en flujo continuo, los produce de una vez. Consiste en hacer fluir los ingredientes por tubos hacia una serie de minicámaras de reacción. La producción del fármaco a medida que se necesite en cualquier sitio significa que se podrán fabricar en distintos enclaves o en hospitales de campaña. También significa que hacen falta menos recursos para almacenarlos y transportarlos, y que la dosis estará adaptada a cada paciente.

En 2016, investigadores del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), en colaboración con la Agencia Estadounidense de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa (DARPA), demostraron por primera vez que se podían fabricar fármacos a medida que se necesitaran. Crearon una máquina del tamaño de un frigorífico que empleaba el flujo continuo para producir cuatro fármacos muy vendidos: hidrocloruro de difenhidramina (alivio de los síntomas de la alergia), diazepam (tratamiento de la ansiedad y de los espasmos musculares), hidro-



cloruro de fluoxetina (antidepresivo) e hidrocloruro de lidocaína (anestésico local). Fabricaron 1000 dosis de cada uno en menos de 24 horas.

La compañía On Demand Pharmaceuticals aprovecha hoy el trabajo original del MIT con varias plataformas que ya están disponibles o en desarrollo, entre ellas la American Made Precursors on Demand (AMPoD, por sus siglas en inglés), que permite la elaboración completa del fármaco desde el precursor hasta la formulación final; Bio-Mod, que fabrica biofármacos; e IV Medicines on Demand, que produce inyectables estériles. Algunas empresas farmacéuticas, como Eli Lilly, Johnson & Johnson, Novartis, Pfizer y Vertex Pharmaceuticals, también están utilizando la técnica de fabricación continua en al menos una parte de sus procesos de producción.

Hoy día, las máquinas portátiles para elaborar fármacos a la carta cuestan millones de dólares, lo que impide su lanzamiento generalizado. También se necesitarán nuevos métodos que garanticen y controlen la calidad para regular tanto la personalización de las fórmulas como los lotes de fármacos para una sola persona. A medida que disminuya el coste y evolucionen los marcos legislativos, la fabricación a la carta podría revolucionar el modo, el lugar y el momento en que se producen los medicamentos.

COMPUTACIÓN

ENERGÍA EXTRAÍDA DE SEÑALES INALÁMBRICAS

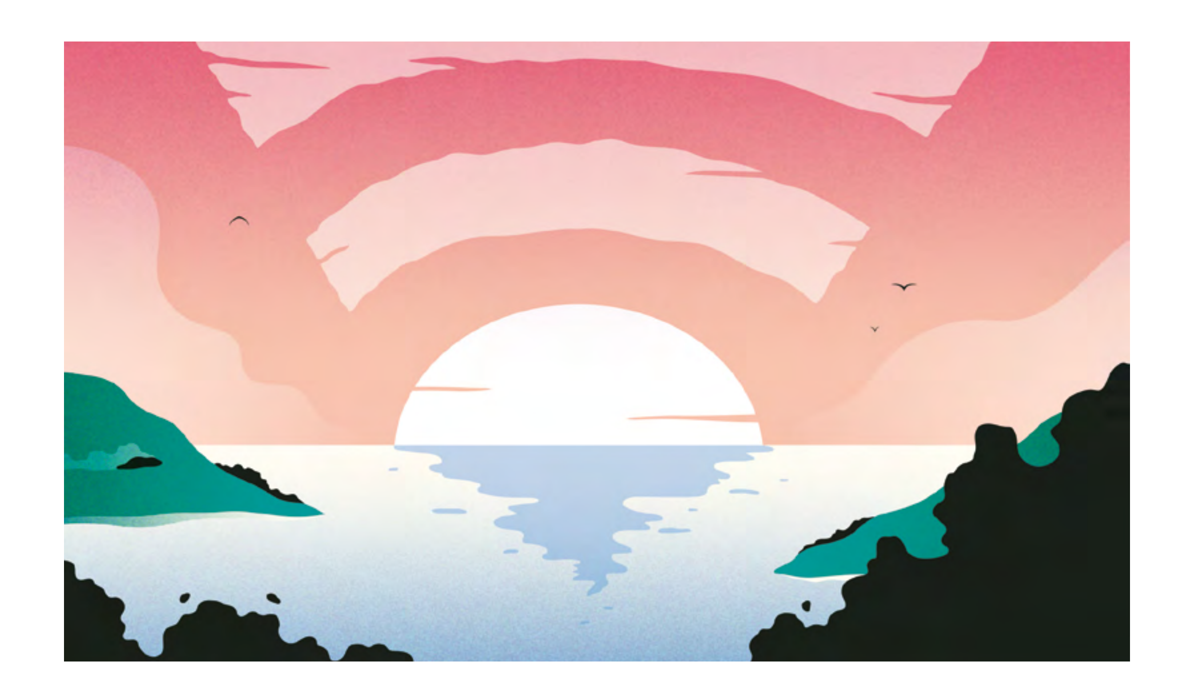
Joseph Costantine | La tecnología 5G ayudará a alimentar la Internet de las cosas

Los aparatos inalámbricos que conforman la Internet de las cosas (IdC) constituyen la columna vertebral de un mundo cada vez más conectado. Los encontramos en electrodomésticos, dispositivos ponibles de uso biomédico y sensores instalados en regiones peligrosas y de difícil acceso. El crecimiento de la IdC abre la puerta a prácticas agrícolas que consumen menos agua y pesticidas, redes inteligentes de mayor eficiencia energética, sensores para detectar defectos que podrían debilitar puentes u otras estructuras de hormigón, y sistemas de alerta temprana para desastres como los desprendimientos de tierra y los terremotos.

Se calcula que para 2025 la IdC contará con 40.000 millones de dispositivos en línea, así que proporcionarles energía cuando la necesiten supondrá un desafío cada vez mayor. Una solución que ya está en desarrollo aprovecha las señales inalámbricas que emiten los enrutadores y puntos de acceso wifi. El despliegue de la quinta generación de tecnología móvil, o 5G, llevará la extracción de energía inalámbrica a nuevas cotas.

La Comisión Federal de Comunicaciones de EE.UU. ha permitido por primera vez que las señales móviles ocupen la banda milimétrica del espectro electromagnético, más energética pero aún segura para las personas. Así que las señales de 5G, aparte de transmitir información a velocidades más altas, transportan más energía que las de 4G. Y eso permite vislumbrar un futuro donde podremos cargar muchos aparatos inalámbricos de baja potencia sin necesidad de enchufarlos a la red eléctrica.

¿Cómo puede un dispositivo absorber energía de las señales inalámbricas? Las señales de wifi y de 5G son ondas electromagnéticas que se propagan a frecuencias comprendidas entre las de la radio de FM, las microondas y las ondas milimétricas. El primer paso consiste en captar la energía que transporta la señal inalámbrica mediante una antena receptora. Esta envía la energía a un circuito rectificador, que emplea semiconducto-



res para generar una corriente continua capaz de cargar o alimentar un dispositivo. Esta combinación de antena y rectificador (o convertidor) se denomina «rectena», y va seguida por un circuito de gestión de potencia que amplifica el voltaje y cuyo consumo es despreciable.

Muchas empresas emergentes ya ofrecen aparatos con carga inalámbrica a distancia, que por el momento emplean transmisores específicos. No obstante, los estudios sugieren que esos dispositivos podrán extraer la energía de las señales de wifi y de 5G en un futuro próximo. Igual que los móviles nos han liberado de la telefonía fija y han transformado nuestra forma de comunicarnos, esta técnica nos hará aún más independientes.

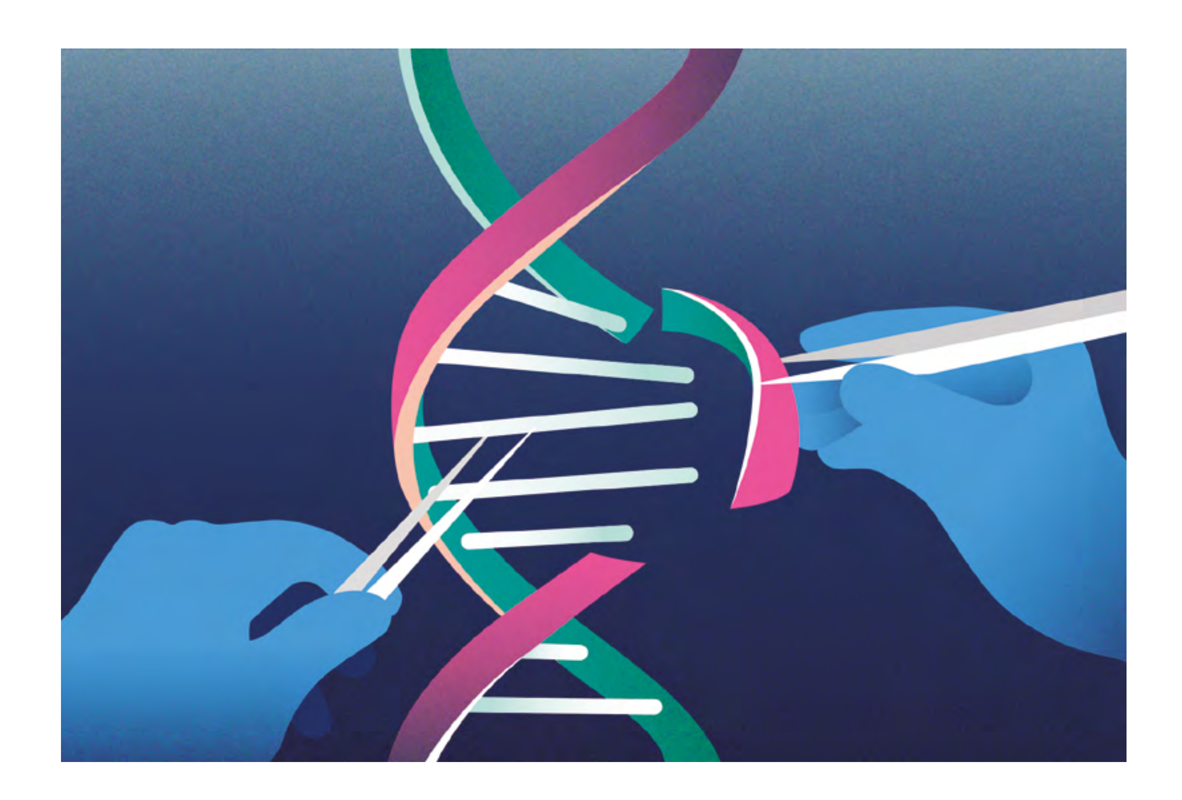
GENÓMICA

BIOINGENIERÍA PARA ENVEJECER MEJOR

Wilfried Weber y P. Murali Doraiswamy | Hay que incrementar la duración de la salud, no solo de la vida

Según la Organización Mundial de la Salud, entre 2015 y 2050 la proporción de la población mundial mayor de 60 años casi se duplicará, al pasar del 12 al 22 por ciento, lo que planteará enormes retos para los sistemas sociales y sanitarios. El envejecimiento está relacionado con enfermedades crónicas como la demencia, el cáncer, la diabetes de tipo 2 y la ateroesclerosis. El deseo de revertir el envejecimiento o encontrar una «fuente de la juventud» es probablemente tan antiguo como la humanidad. Empezamos a conocer los mecanismos moleculares del envejecimiento que podrían ayudarnos a llevar una vida que no solo será más larga, sino también más sana.

Se están esclareciendo muchos mecanismos clave gracias a la llegada y el refinamiento de las



denominadas técnicas ómicas (que cuantifican a la vez la actividad de todos los genes o la concentración de todas las proteínas o metabolitos de una célula) combinadas con los conocimientos de la epigenética. Un ejemplo fascinante lo constituyen la combinación de marcas epigenéticas específicas (modificaciones que cambian la actividad génica debido al comportamiento y al entorno) o de metabolitos, con el objeto de identificar la edad biológica de un organismo.

Tales marcas también predicen convincentemente las enfermedades de los ancianos y el riesgo de muerte que va asociado. Gracias a la secuenciación del genoma de cada célula en un organismo sabemos que el número de mutaciones se incrementa durante el envejecimiento: su reparación suele dejar huellas en el ADN (otro tipo de marcador) que estarían relacionadas con el envejecimiento. Los daños del ADN también se asocian con la senescencia de las células (lo que significa que ya no se reproducirán más) o con el agotamiento de las células madre necesarias para la renovación de células y tejidos.

El conocimiento cada vez mayor de los mecanismos que nos hacen envejecer está permitiendo desarrollar tratamientos dirigidos. Por ejemplo, en un estudio clínico pionero reciente se ha sugerido que la administración durante un año de un cóctel de fármacos (uno de ellos la hormona del crecimiento de los humanos) podría atrasar 1,5 años el «reloj biológico». De igual forma, en un modelo de roedor se ha demostrado que la genoterapia dirigida sobre tres genes asociados a la longevidad mejora o revierte cuatro afecciones seniles frecuentes. También se han identificado proteínas sanguíneas de personas jóvenes que, cuando se infunden en la sangre de ratones ancianos, hacen mejorar los marcadores de la disfunción cerebral senil. El resultado indica que podría elaborarse un tratamiento que corrigiera el declive cognitivo de los humanos.

Inspirados por los nuevos hallazgos sobre el mecanismo molecular del envejecimiento y animados por los primeros resultados prometedores de los ensayos clínicos, más de cien compañías se han puesto manos a la obra para desarrollar estrategias farmacológicas o genotecnológicas que analicen y modifiquen la «duración de la salud», además de la duración de la vida. La mayoría de las compañías están realizando estudios preclínicos o acaban de empezar los ensayos clínicos. Esta campaña de investigación y desarrollo, respaldada por las altas expectativas de los inversores, alimenta la esperanza de una vejez más sana.

QUÍMICA

AMONÍACO VERDE

Javier García Martínez y Sarah E. Fawcett | Cómo reducir la huella de carbono de la producción de fertilizantes

El proceso Haber-Bosch, una de las invenciones más importantes y menos conocidas del siglo xx, permite la síntesis de amoníaco a escala industrial. Ese amoníaco sirve para obtener los fertilizantes que sustentan la mitad de la producción mundial de alimentos, así que es clave para la seguridad alimentaria del planeta. Sin embargo, su producción consume mucha energía y requiere la presencia de un catalizador que «fije» el nitrógeno con hidrógeno.

A diferencia del nitrógeno, que es el principal componente del aire que respiramos, el hidrógeno debe producirse de manera sintética. Hoy se obtiene mediante el reformado de combustibles fósiles, exponiendo gas natural, carbón o petróleo a vapor de agua a alta temperatura para generar hidrógeno gaseoso. El problema es que en ese proceso también se forman grandes cantidades de dióxido de carbono, que representan entre el 1 y el 2 por ciento de las emisiones globales.

El hidrógeno verde, que se obtiene disociando el agua con energías renovables, promete cambiar esa situación. Además de eliminar las emisiones de carbono durante el proceso, el producto final es mucho más puro: no contiene sustancias derivadas de los combustibles fósiles, como algunos compuestos con azufre y arsénico que pueden «contaminar» el catalizador y reducir el rendimiento de la reacción.

Ese hidrógeno más limpio permitirá el uso de catalizadores más eficientes, que ya no necesitarán tolerar los compuestos nocivos procedentes de los combustibles fósiles. De hecho, empresas como la danesa Haldor Topsoe ya han anunciado el desarrollo de nuevos catalizadores para generar amoníaco verde a partir de fuentes totalmente renovables.

En España, la compañía de fertilizantes Fertiberia se ha asociado con la eléctrica Iberdrola para ampliar los planes de producción de amoníaco verde, pasando de una planta piloto de 20 megavatios que generará hidrógeno por electrólisis con energía solar desde 2022 a otra de 800 megavatios que entrará en funcionamiento en 2027. Se espera que la inversión, estimada en 1800 millones de euros, genere 4000 puestos de trabajo y evite la emisión de hasta 400.000 toneladas de dióxido de carbono al año, lo mismo que liberarían unos 60.000 automóviles.



Un obstáculo importante es el elevado coste actual del hidrógeno verde. Para tratar de resolver este problema, treinta empresas europeas vinculadas al sector energético han lanzado el proyecto HyDeal Ambition, que aspira a suministrar hidrógeno verde a 1,5 euros por kilogramo antes de 2030 gracias a innovaciones en la producción, el almacenamiento y el transporte. Si tiene éxito, la iniciativa dará pie a toda una serie de nuevas aplicaciones del amoníaco verde, incluida la posibilidad de volver a descomponerlo en hidrógeno para establecer un círculo virtuoso entre el amoníaco y el hidrógeno verdes.

MAKSIMYREMENKO

DISPOSITIVOS INALÁMBRICOS PARA MEDIR BIOMARCADORES

Joseph Costantine | Seguimiento continuo y no invasivo de las enfermedades crónicas

A nadie le gustan las agujas. Pero los análisis de sangre son frecuentes para identificar y rastrear determinados marcadores biológicos (biomarcadores) con los que vigilar enfermedades crónicas como la diabetes y el cáncer. En la actualidad, más de cien compañías están desarrollando sensores portátiles e inalámbricos que pronto facilitarán el seguimiento continuo de esta información vital.

Cada dispositivo de control utiliza una estrategia diferente para detectar los biomarcadores en el sudor, las lágrimas, la orina o la sangre. Algunos se asoman a los tejidos gracias a la luz o a la radiación electromagnética de poca potencia (como los móviles o los relojes inteligentes) combinadas con antenas y electrónica. Otros son sensores electrónicos flexibles que se pueden llevar pegados a la piel. Para detectar un determinado biomarcador, los dispositivos recaban cambios de corriente, de voltaje o de la concentración electroquímica.

La diabetes es uno de los principales objetivos de estas técnicas, pues en 2030 se espera que permitan diagnosticarla a 578 millones de personas en todo el mundo. Para responder al aumento continuo de comprobaciones de la glucemia, un dispositivo portátil ofrecería un seguimiento no invasivo gracias a los campos electromagnéticos inalámbricos de ondas milimétricas y a un sensor del infrarrojo cercano. Por ejemplo, la variación de voltaje en el dedo de un paciente está correlacionada con la concentración de la glucosa. En otra estrategia, la electrónica incorporada en la ropa detectaría la glucemia en el torrente circulatorio con ondas electromagnéticas dentro del margen de las microondas. En una tercera estrategia, un circuito en un tatuaje valoraría la glucosa del sudor mediante unos electrodos que extraen cantidades diminutas del líquido intersticial que fluye de forma natural desde los capilares. Al igual que los detectores de glucosa, los circuitos de los tatuajes deducirían del sudor los cambios del lactato, una aplicación que está atrayendo la inversión de la industria del atletismo.

Los sistemas con transmisión inalámbrica se emparejan con diferentes tipos de sensores, como los formados por alineamientos densos de nanotubos de carbono, o los que impulsan nanopartículas magnéticas por canales diminutos de microfluídica, para detectar los biomarcadores mediante un cambio de voltaje o de corriente. Dichas técnicas abren la puerta a un «lenguaje electrónico» capaz de distinguir diferentes muestras líquidas.

Las lágrimas también resultan sorprendentemente reveladoras. Unas lentillas electrónicas transparentes recogen sin cables los biomarcadores de cáncer, así como la glucemia con la que vigilar la diabetes. Los biomarcadores salivales indicarían estrés fisiológico o psicológico, o enfermedades como el sida, infecciones intestinales, un cáncer o la COVID-19. Cuando se integren en un protector bucal que incorpore la técnica de identificación por radiofrecuencia, los sensores para la saliva también controlarán la higiene bucal, al detectar caries u otras anomalías.

CASAS IMPRESAS CON MATERIALES LOCALES

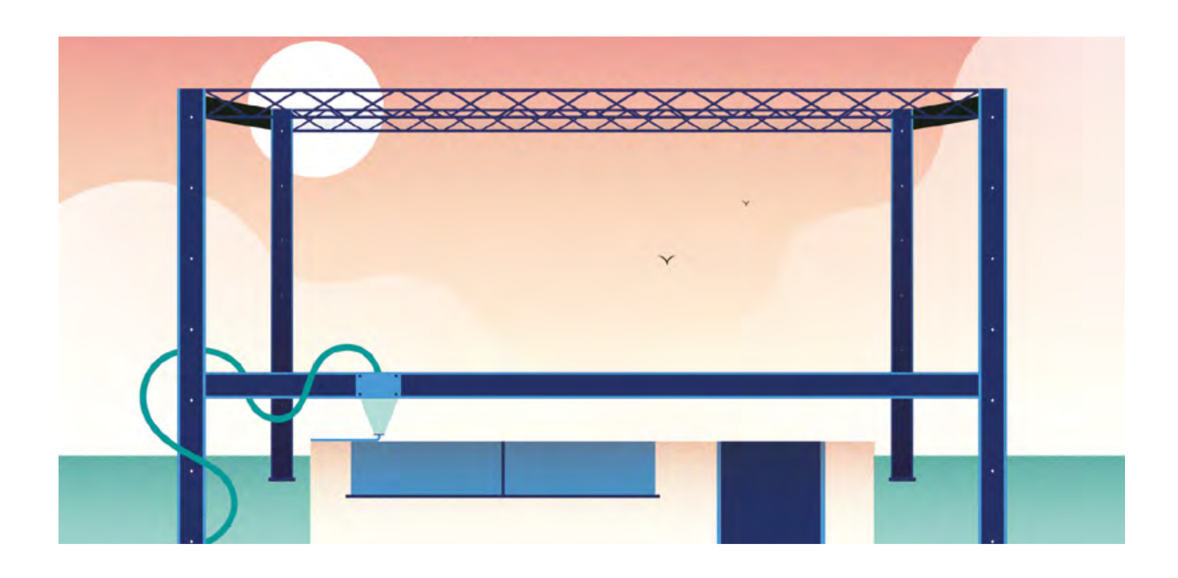
Bernard S. Meyerson y Carlo Ratti | La tierra sustituye al hormigón

Algunos avances, como las vacunas infantiles o la cirugía ocular LASIK han mejorado de forma espectacular la calidad de vida de mucha gente en el primer mundo, pero su influencia en los países en vías de desarrollo a menudo ha sido mucho menor o ha sufrido grandes retrasos. En cambio, las casas fabricadas con impresoras 3D podrían dar respuesta a los problemas de vivienda inadecuada que afectan a 1600 millones de personas de todo el mundo, según cálculos de la ONU.

La idea de imprimir viviendas en 3D no es nueva. Varias empresas la han llevado a la práctica en Long Island y Austin, con resultados prometedores. Los materiales necesarios, como el hormigón y diversas mezclas de arena, plásticos y aglutinantes, se llevan por carretera hasta la obra y se extruyen mediante una enorme impresora 3D. Al tratarse de un método de construcción relativamente sencillo y barato, la impresión de casas parece idónea para paliar los problemas de vivienda en regiones remotas y empobrecidas. Sin embargo, la falta de infraestructuras para transportar los materiales había impedido su uso.

Recientemente, varias compañías se han inspirado en proyectos relacionados con Marte, donde los materiales presentes en el planeta constituyen la única opción disponible. En el pequeño municipio italiano de Massa Lombarda, un prototipo diseñado por el estudio de arquitectura de Mario Cucinella emplea los suelos arcillosos locales para imprimir los elementos de las viviendas, lo que reduce de forma considerable la complejidad, el coste y el consumo energético de la obra. La tierra se mezcla con cáñamo y un aglutinante líquido, y WASP, una empresa italiana de impresión 3D, la extruye capa a capa para crear las complicadas formas y superficies que precisa una vivienda. El uso de materiales autóctonos reduce hasta en un 95 por ciento la masa transportada a la obra.

Otro método que ha probado WASP (en colaboración con la firma de diseño RiceHouse) se inspira en los siglos de experiencia creando



ladrillos de barro que poseen los habitantes de las regiones áridas. El proceso combina la tradicional mezcla de barro con un filamento aglutinante, por ejemplo una fibra natural. En vez de prensar ese material a mano en un molde, se inyecta en una impresora 3D suministrada por WASP. Eso permite levantar una casa mucho más deprisa que con las técnicas tradicionales y con la resistencia adicional que otorga la rígida geometría de las paredes impresas. Además, una parte importante del material proviene del propio terreno de la obra.

Con ese método, es posible descomponer las estructuras al final de su vida útil para recuperar las materias primas y reutilizarlas. Este modelo circular de cero residuos se remonta a hace miles de años: en el monte Erice, en Sicilia, aún existen casas construidas con materiales provenientes de las viviendas que las precedieron en los diez siglos anteriores.

INGENIERÍA Y COMPUTACIÓN

SATÉLITES PARA CONECTAR EL MUNDO

Rajalakshmi Nandakumar | La Internet de las cosas se pone en órbita

La Internet de las cosas (IdC) cuenta con al menos 10.000 millones de aparatos activos, y se prevé que esa cifra aumente a más del doble en los próximos diez años. Para maximizar los beneficios de la IdC en materia de comunicación y automatización, los dispositivos deben repartirse por todo el mundo y recabar zetaoctetos de datos. Estos se incorporan a centros de procesamiento en la nube, que emplean algoritmos de inteligencia artificial para identificar pautas y anomalías, como los patrones meteorológicos y los desastres naturales. Pero hay un gran problema: las redes de telefonía móvil cubren menos de la mitad del planeta, lo que deja enormes lagunas de conectividad.

Esas lagunas podrían eliminarse mediante una red de nanosatélites de bajo coste y con un peso inferior a 10 kilogramos, que girarían alrededor de la Tierra a una altitud de unos cientos de kilómetros. El primer nanosatélite se lanzó en 1998, y hoy unos 2000 *cubesats* actúan como sensores en órbita. Empresas como SpaceX, OneWeb, Amazon y Telesat han recurrido a los nanosatélites para ofrecer acceso global a Internet.

Pronto será posible comunicarse con esos nanosatélites desde pequeños aparatos de la IdC alimentados con baterías y emplazados en la Tierra. Los datos de un dispositivo (por ejemplo, la ubicación proporcionada por un sensor de seguimiento) se enviarían a un satélite usando protocolos de comunicación de bajo coste y bajo consumo similares a los de las redes de largo alcance y Sigfox, que pueden descodificar incluso señales débiles. A continuación, los datos se transferirían a estaciones terrestres para su análisis.



Esta técnica ya ha permitido implementar diversas aplicaciones basadas en datos en lugares que antes resultaban inaccesibles o difíciles de conectar. La empresa estadounidense de telecomunicaciones Iridium, por ejemplo, posee una red de 66 satélites en órbitas terrestres bajas, capaces de establecer conexiones entre barcos y aviones que se hallen volando en cualquier parte del mundo. La compañía británica Lacuna Space

conecta sensores alimentados por baterías con sus satélites en órbitas terrestres bajas para realizar seguimiento de mercancías (como paquetes transportados por mar) o monitorizar explotaciones agrícolas y facilitar prácticas con un uso más eficiente de agua, fertilizantes y herbicidas. Myriota, en Adelaida, emplea la IdC en el espacio para vigilar especies en peligro de extinción, como los rinocerontes. Y Microsoft se ha asociado con SpaceX para lanzar una plataforma de computación en la nube que permita trasladar datos desde un satélite a servidores situados en centros de procesamiento.

La «IdC espacial» aún se enfrenta a multitud de retos antes de extenderse a escala global. Por ejemplo, los nanosatélites tienen una vida útil de tan solo unos dos años y precisan costosas estaciones terrestres. Para abordar el creciente problema de la basura espacial, la NASA y otros organismos planean desorbitar automáticamente los satélites al final de su vida útil o retirarlos empleando otras naves espaciales.

También será importante proporcionar enlaces seguros, fiables y de banda ancha desde los satélites, para mantener la conectividad en diversos terrenos y condiciones meteorológicas. A tal fin, las empresas están probando nuevas frecuencias y desarrollando esquemas de codificación que aumentan el ancho de banda y la fiabilidad de los sistemas de comunicación.

COMITÉ DE EXPERTOS

Mariette DiChristina, presidenta del comité, es decana y profesora de práctica periodística en la Facultad de Comunicación de la Universidad de Boston. Fue redactora jefa de *Scientific American* y directora de edición, publicación y revistas de *Springer Nature*.

Bernard S. Meyerson, vicepresidente del comité, es director de innovación emérito de IBM. Ha recibido numerosos galardones por sus trabajos en física, ingeniería y economía.

Enass Abo-Hamed es directora ejecutiva de H2GO Power y disfrutó de una beca empresarial de la Real Academia de Ingeniería del Reino Unido.

Jeff Carbeck, fundador de varias empresas, es vicepresidente de innovación corporativa en Eastman.

Rona Chandrawati es profesora en la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Nueva Gales del Sur en Sídney.

Joseph Costantine es profesor de ingeniería eléctrica e informática en la Universidad Americana de Beirut y fue declarado Joven Científico por el Foro Económico Mundial (FEM).

P. Murali Doraiswamy es profesor de psiquiatría y medicina en la Facultad de Medicina de la Universidad Duke e investigador en el Instituto Duke de Neurociencias.

Yabebal Tadesse Fantaye es cofundador de 10 Academy y director de ciencia de datos en Adludio.

Sarah E. Fawcett es profesora de oceanografía e investigadora principal del Laboratorio de Bioquímica Marina en la Universidad de Ciudad del Cabo.

Olga Fink es profesora de sistemas de mantenimiento inteligente en la Escuela Politécnica Federal de Zúrich.

Javier García Martínez es director del Laboratorio de Nanotecnología Molecular en el Departamento de Química Inorgánica de la Universidad de Alicante.

Daniel E. Hurtado es profesor de la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile, donde dirige el Grupo de Medicina Computacional.

Greta Keenan es especialista del Programa para Ciencia y Sociedad del FEM. También dirige la Comunidad de Jóvenes Científicos y el Consejo para el Futuro Global del FEM sobre Colaboración Científica.

Corinna E. Lathan es cofundadora y directora ejecutiva de AnthroTronix, y forma parte de la junta directiva de PTC. Fue presidenta fundadora del Consejo para el Futuro Global del FEM sobre el Perfeccionamiento Humano.

Sang Yup Lee fue copresidente del Consejo para el Futuro Global del FEM sobre Biotecnología. Es profesor distinguido de ingeniería química y biomolecular y vicepresidente de investigación en el Instituto Superior de Ciencia y Tecnología de Corea.

Geoffrey Ling, coronel retirado del Ejército de EE.UU., es experto en desarrollo de tecnología y transición comercial. Es profesor de neurología en la Universidad de Ciencias de la Salud de los Servicios Uniformados y en la Universidad Johns Hopkins, así como director ejecutivo de On Demand Pharmaceuticals. Declaración: Ling se abstuvo de participar en las discusiones y votaciones sobre los fármacos a la carta.

Andrew Maynard es decano del Colegio de Futuros Globales y director del Laboratorio de Innovación en Riesgos de la Universidad Estatal de Arizona.

Ruth Morgan es profesora de criminalística y ciencias forenses en el Colegio Universitario de Londres y directora del Centro de Ciencias Forenses de dicha universidad. Es miembro del Consejo para el Futuro Global del FEM sobre Colaboración Científica.

Rajalakshmi Nandakumar es profesora en el campus tecnológico y el Departamento de Ciencias de la Información de la Universidad Cornell.

Elizabeth O'Day es directora ejecutiva y fundadora de Olaris, en Cambridge (Massachusetts).

Mine Orlu es profesora de la Facultad de Farmacia del Colegio Universitario de Londres.

Carlo Ratti es profesor de tecnologías urbanas en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, donde dirige el Laboratorio Senseable City.

Barry Shoop general de brigada retirado del Ejército de EE.UU., es decano de la Escuela de Ingeniería Albert Nerken en la universidad Cooper Union.

Sophia M. Velastegui es directora de producto en Aptiv, presidenta de la junta directiva de BlackLine y codirectora del Consejo para el Futuro Global del FEM sobre Manufactura Avanzada y Cadenas de Valores.

Wilfried Weber es profesor de biología sintética en el Centro de Estudios de Señalización Biológica de la Universidad de Friburgo, en Alemania.

Xun Xu es director ejecutivo de BGI-Research y miembro del Consejo para el Futuro Global del FEM sobre Biotecnología.

HISTORIA DE LA CIENCIA

LA MEDICINA EN LA EDAD MEDIA, ¿CIENCIA O ARTE?

Sergi Grau Torras | La cultura latina medieval transformó la filosofía natural clásica en una nueva ciencia médica que integraba teoría y práctica

La imagen que predomina sobre la medicina en la Edad Media es que no tuvo una tradición científica. Es evidente que si buscamos precursores de la patología moderna o las ciencias biomédicas actuales no los encontraremos. Sin embargo, si pensamos en un sistema médico racional, con una metodología deductiva fundamentada en las autoridades clásicas y una enseñanza institucionalizada en las universidades europeas, entonces podemos constatar que el Medievo dio lugar a un sistema médico de tradición científica que tuvo una gran proyección durante muchos siglos para explicar de forma coherente la relación entre salud y enfermedad.

Filosofía natural y medicina

La filosofía natural es la disciplina que se dedicaba al estudio filosófico de la naturaleza (*physis*) y de los fenómenos naturales en todas sus variantes, antes de que se formaran las ciencias modernas. Algunas de las consideraciones de la filosofía natural también repercutían sobre aspectos médicos: la medicina clásica partía de una importante tradición filosófica para explicar la naturaleza de las causas de la enfermedad, la relación del ámbito humano y el universo en general, y los principios del diagnóstico, el tratamiento y la curación de las enfermedades. En este sentido, la medicina medieval se fundaba en la tradición clásica de los cuatro humores de Hipócrates y Galeno. La teoría propugnaba una relación entre los fluidos del cuerpo y los cuatro elementos con la teoría de la justa medida: cuando sus propiedades y cantidades estaban proporcionadas y su mezcla era completa, se gozaba de buena salud; por el contrario, cuando se producía un desequilibrio y alguno de los elementos se separaba y no se mezclaba con los demás, se enfermaba.

Durante la Edad Media se produjo una importante circulación de traducciones latinas que recuperó gran parte de la cultura clásica. Estas traducciones fueron de gran importancia para la cultura latina y, especialmente, para el desarrollo de disciplinas como la filosofía natural, basada principalmente en la obra de Aristóteles. Su asimilación en la cultura latina contribuyó a transformar progresivamente la visión del mundo y la naturaleza, sobre todo al establecerse como materia de estudio en las facultades de Artes, las escuelas preparatorias para los estudios superiores (teología, derecho y medicina). Esto permitió a los médicos estudiar y profundizar sobre el conocimiento teórico de la naturaleza y, a su vez, promover una nueva práctica médica fundamentada en la filosofía natural aristotélica.

Esta nueva práctica médica se estandarizó en las facultades de medicina de las principales universidades europeas (París, Montpellier, Oxford, Bolonia, etcétera). Giraba alrededor de una colección de obras de medicina clásica y árabe, conocida como la *Articella* («el pequeño arte»), que se utilizó como libro de texto y ma-

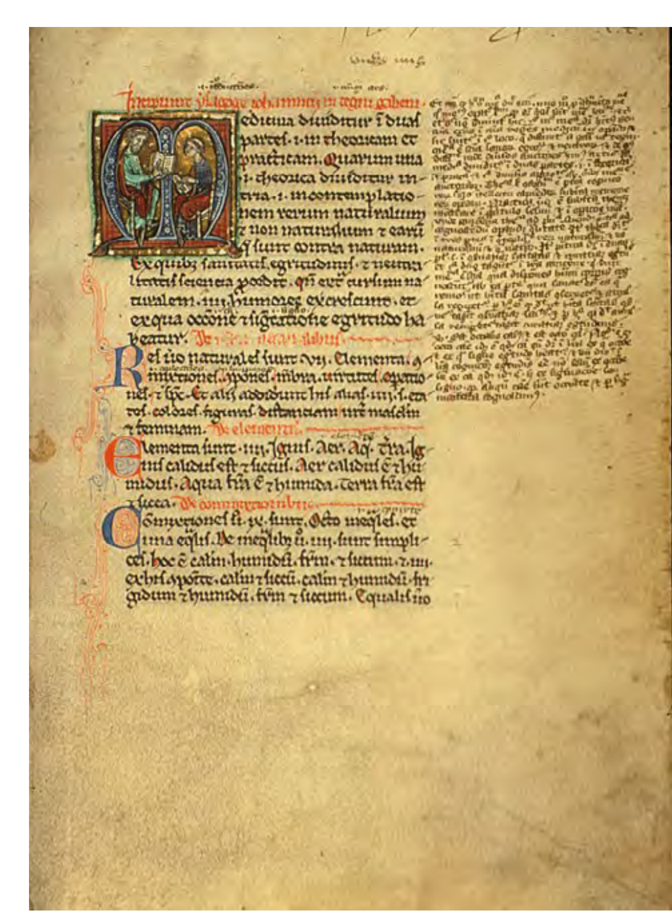
nual de referencia en las universidades entre los siglos XIII y XVI. La formación también se complementaba con una extensa producción escrita que incluía una gran variedad de géneros literarios que iban desde los comentarios a las autoridades médicas (principalmente Hipócrates y Galeno) y los compendios de medicina teórica y práctica hasta los aforismos, pasando por las monografías especializadas en enfermedades y tratamientos específicos.

Toda esa producción escrita surgió en el contexto universitario de la Edad Media y utilizó un método de estudio muy peculiar. Nos referimos a la escolástica, un sistema que aplicaba el método racional de la lógica y el silogismo al estudio y la interpretación de los textos de las autoridades. Esta formación académica dio lugar a un nuevo profesional sanitario: el médico racional e intelectual. A través de sus reflexiones y debates, los médicos no solo ofrecieron una especulación doctrinal sobre la salud y la enfermedad basada en la filosofía natural, sino también nuevas soluciones prácticas en su ejercicio diario.

La medicina como ciencia aristotélica

En este contexto, los médicos racionales también se dedicaron a subrayar las similitudes y desavenencias entre la filosofía natural y la medicina, con el objetivo de definir los límites de la certeza médica y el uso que el médico debía hacer de la filosofía natural. Esto facilitó que, con el tiempo, empezaran a dotar a la medicina de un contenido teórico o filosófico, y estipularan la naturaleza de su tarea como una *scientia* que derivaba de los principios de las causas universales a efectos específicos.

Sin embargo, esta concepción teórica de la medicina no tenía fácil acomodo con aquella que entendía la medicina como un arte o una técnica. Los conceptos de «ciencia» y «arte» tienen su origen en la civilización grecorromana. Los términos exactos eran *epistéme* y *téchne* en griego, y *scientia* y *ars* en latín, respectivamente. Mientras que el concepto de scientia se puede traducir como «ciencia» solo en el sentido que significa «conocimiento empírico a partir de la deducción», el término *ars* según la concepción aristotélica se puede entender como «la técnica o habilidad que se aprende a través de la experiencia o de la acción».



Hunayn ibn Isḥāq (Joannitius): *Isagoge Johannitii in Tegni Galeni* (Articella). Oxford, s. XIII.

A pesar de que la teoría de los humores supuso un marco teórico, en la tradición clásica, tanto Hipócrates como Galeno entendían la medicina como un arte. En la *Ética*, Aristóteles ilustra su visión del arte con la medicina, puesto que esta disciplina constituye el prototipo de una ciencia que combina teoría y práctica.

Esta cuestión se convirtió en un tópico de discusión para los médicos medievales con la llegada de la traducción latina de la *Isagoge* (*Cuestiones sobre medicina*), de Hunayan ibn Ishaq, (conocido en Occidente como Johannitus), una obra fundamental de la enseñanza médica. El prólogo de la *Isagoge* contiene la famosa sentencia: «la medicina se divide en dos partes, una teórica y una práctica». Uno de los autores más importantes en explorar esta cuestión fue Avicena, el médico más famoso del mundo árabe. En su célebre *Canon de la medicina*, Avicena definió la medicina como la ciencia del cuerpo humano en tanto que el

cuerpo es sanable, y dividió su actividad entre una teoría y una práctica: una es la ciencia que estudia los principios de la medicina y la otra se relaciona con la forma de poner en práctica estos principios. Ahora bien, ¿hasta qué punto una debía prevalecer sobre la otra? O, mejor aún, ¿hasta qué punto el arte podía ser considerado también una ciencia?

La medicina entre el arte y la ciencia

Uno de los médicos más importantes del Medievo latino fue Arnau de Vilanova (c. 1240-1311), médico de reyes y papas, profesor de la facultad de medicina de Montpellier y autor de una extensa obra médica. Arnau de Vilanova constituye un caso representativo de esta nueva práctica médica a partir de la filosofía natural, es decir, aquella que tiene que ver con la construcción de una medicina teórica basada en una nueva metodología deductiva que se fundamenta en las autoridades médicas, entre las cuales destaca Galeno. De hecho, De Vilanova fue uno de los responsables de la introducción de un gran número de obras de Galeno en el currículum de las facultades de medicina.

También definió los límites de la certeza médica y el uso de la filosofía natural por parte de los médicos con la idea de construir el ejercicio de la medicina como una disciplina autónoma. En este sentido, De Vilanova sienta las bases de su epistemología médica al plantearse el debate sobre si la medicina es una ciencia (*scientia*) o una técnica (*ars*), y las diferencias entre los objetivos del médico y los del filósofo natural. Para Arnau de Vilanova, la medicina es una ciencia que se fundamenta en la naturaleza, y la filosofía natural aristotélica es la herramienta para conocer esa naturaleza. A partir de razonamientos generales, el médico puede extraer conclusiones específicas. Sin embargo, por encima de todo considera al médico como un técnico práctico y, como tal, considera que solamente debe centrarse en aquellos elementos de la filosofía natural que le sirvan para su tarea, que no es otra que la custodia de la disposición natural en el cuerpo humano, llamada salud o temperamento natural.

Por esta razón, a pesar de que en el ejercicio de su disciplina no se puede disociar la parte teórica de la práctica, De Vilanova dota la experiencia diaria del médico de una importancia primordial para formar las normas mediante las cuales se rige la medicina. Con su aportación al debate, constatamos una progresiva transformación de la concepción clásica de la medicina como arte, hacia formas de organización del conocimiento más complejas que integran teoría y práctica como parte fundamental de una naciente ciencia médica. El sentido de esta idea también lo expone otro médico de la época, Pietro de Abano, con la frase: «el fin de la medicina no es la verdad, sino la práctica».

Conclusiones

Esta transformación del arte médico se produce gracias al vínculo de la medicina con la filosofía natural. Su interacción permitió dotar a la medicina de atributos de tradición científica. Primero, a través de una racionalidad subyacente que suponía que las acciones de los médicos, sus diagnósticos y las terapias tenían sentido en el marco de una visión coherente y racional del mundo natural. Segundo, permitió que los médicos empezaran a tomar consciencia del estatus epistemológico de la medicina como una ciencia aristotélica. Y, por último, insistieron en que la práctica médica tenía que fundamentarse en la *experiencia* del médico, un término que está relacionado con la experimentación, y donde la técnica tenía un peso específico en la producción de conocimiento. La conjunción de todos estos elementos creó una medicina de tradición científica que tuvo una gran repercusión en la historia para explicar la relación entre la salud y la enfermedad.

Sergi Grau Torras, experto en historia de la ciencia medieval y del Renacimiento, es profesor asociado en el Instituto de Historia de la Ciencia de la Universidad Autónoma de Barcelona.



PARA SABER MÁS

El médico en la Edad Media. Luis García Ballester y Jon Arrizabalaga en *El médico de familia en la historia*, dirigido por F. Bujosa Homar. Doyma, 1999.
Universities, medicine and science in the medieval west. Vern L. Bullough. Ashgate Variorum, 2004.
Medieval medicine: The art of healing, from head to toe. Luke Demaitre. Praeger, 2013.
Les transformacions d'Aristòtil. Filosofia natural i medicina a Montpeller: el cas d'Arnau de Vilanova (c. 1240-1311). Sergi Grau Torras. Institut d'Estudis catalans, 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Materia médica medieval. José María Valderas en *Ciencia medieval*, colección TEMAS de *IyC*, n.º 41, 2005.
La anatomía latina medieval. Pedro Gil Sotres en *Ciencia medieval*, colección TEMAS de *IyC*, n.º 41, 2005.

CON LOS ANTIBIÓTICOS, CASI SIEMPRE MENOS ES MÁS

Claudia Wallis | En muchas infecciones habituales basta con menos días de tratamiento

Mi marido tiene la mala costumbre de no terminar el tratamiento cuando le recetan una o dos semanas de antibióticos. Lo abandona una vez que le desaparecen los síntomas, pese a que el prospecto advierte de tomarlo durante el tiempo prescrito. Hacer caso omiso a las indicaciones del médico no es buena idea, pero en esto tal vez tenga razón.

Numerosos estudios indican que muchas infecciones bacterianas responden igual de bien a una tanda breve de antibióticos, de unos días, que a la pauta acostumbrada, que se cuenta por semanas. Los tratamientos cortos también comportan menor riesgo de efectos secundarios. La solidez de esas investigaciones convenció al Colegio de Médicos de EE.UU., que publicó el pasado junio nuevas recomendaciones sobre prácticas óptimas en cuatro tipos de infecciones: neumonía (extrahospitalaria), infección urinaria no complicada, una inflamación de la piel llamada celulitis infecciosa (pero solo en ausencia de pus) y bronquitis aguda en personas con enfermedad pulmonar obstructiva crónica. «Representan algunas de las infecciones que los internistas tratan con mayor frecuencia cada semana y que suelen recibir tratamientos innecesarios», asegura Rachael Lee, primera autora de dichas recomendaciones y especialista en enfermedades infecciosas de la Universidad de Alabama, Birmingham. La gran pregunta que se plantea ahora es si los médicos tomarán nota y cambiarán su forma de actuar.

La razón que impulsa a usar los antibióticos con mayor moderación es la amenaza mundial que suponen los microbios resistentes al tratamiento, que han evolucionado rápidamente con el uso excesivo de estos medicamentos. Entre tales microorganismos peligrosos se encuentran la temida bacteria necrosante *Staphylococcus aureus* resistente a la meticilina, así como cepas microbianas farmacorresistentes causantes de infecciones urinarias, tuberculosis y malaria. Sin embargo, buena parte de los médicos persisten en la falsa creencia de que administrar antibióticos durante más tiempo frena las cepas resistentes. «Se trata de una leyenda urbana sin fundamento», sostiene Brad Spellberg, especialista en enfermedades infecciosas y director médico del Centro Médico del Condado de Los Ángeles y la Universidad del Sur de California. «Solían recetarse antibióticos solo durante el tiempo necesario para controlar la infección y mantener al paciente fuera de peligro. Pero los tratamientos se fueron prolongando con la



convicción errónea de que su mayor duración evitaría la recaída por patógenos resistentes, lo que es absolutamente falso.»

Spellberg es un firme defensor de las pautas cortas. Su sitio web hace un seguimiento de los ensayos aleatorizados controlados que comparan la administración de antibióticos en tratamientos cortos y largos. La pasada primavera recogía más de 70 estudios de 14 enfermedades infecciosas, que demostraban que las pautas reducidas funcionan igual de bien, aunque en algunos ensayos el antibiótico de corta duración no era el mismo que el del tratamiento prolongado. Algunos de los estudios también vinculan la administración más breve a una menor aparición de microorganismos farmacorresistentes. Spellberg suele destacar lo absurdo que es prescribir en unidades de una o dos semanas —a las que se refiere como «unidades de Constantino», por el emperador romano que decretó en el año 321 d. C. que una semana dura siete días—, pues no responde a ningún parámetro biológico.

Los datos que respaldan los tratamientos más cortos son especialmente convincentes en la neumonía extrahospitalaria. No menos de doce ensayos aleatorizados controlados realizados en adultos han demostrado que el efecto es igual de bueno con entre tres y cinco días de antibióticos que con entre cinco y catorce días; y un estudio de 2021 llegó a las mismas conclusiones en niños. Más de 25 estudios acreditan que los tratamientos cortos también funcionan en las infecciones de los senos paranasales y en las reagudizaciones de la bronquitis crónica. Ambos procesos pueden deberse a virus, en cuyo caso los antibióticos no servirían para nada, según advierte Spellberg. «Si se van a administrar antibióticos a personas que no los necesitan, por lo menos hagan el favor de hacerlo durante poco tiempo», comenta.

Los tratamientos breves tienen otras ventajas. Dañan menos a las bacterias beneficiosas que constituyen nuestro microbioma (uno de los motivos por los que causan menos efectos secundarios). Y los pacientes cumplen mejor las prescripciones cortas. «Es mucho más fácil acordarse de tomar las pastillas durante cinco días que durante diez», apunta Helen Boucher, jefa de enfermedades infecciosas del Centro Médico Tufts y tesorera de la Sociedad Estadounidense de Enfermedades Infecciosas (IDSA). Pero las encuestas ponen de manifiesto lo difícil que es cambiar los hábitos de prescripción. Un estudio de 2019 sobre la prescripción de antibióticos entre 10.616 médicos de familia en Ontario reveló que el 35 por ciento de las recetas eran para nueve días o más.

No obstante, ciertas infecciones sí requieren un tratamiento prolongado. En un estudio publicado en mayo de 2021 se observó que, en las infecciones de las prótesis articulares, seis semanas de antibioticoterapia fueron menos eficaces que doce. Y pese a que se tiende a recetar demasiados antibióticos en las infecciones de oído infantiles, se logra mayor eficacia con la administración prolongada en los menores de dos años.

Prescribir antibióticos con la duración adecuada es una parte fundamental de la lucha contra las «superbacterias» resistentes a los medicamentos, explica Boucher: «Es un mensaje que llevamos lanzando en la IDSA desde hace años». Como pacientes, también podemos contribuir. Pregunte a su médico si es posible acortar el tratamiento y en qué medida es probable que este acelere su recuperación.

Claudia Wallis, es periodista científica. Ha publicado artículos en *The New York Times*, *Time*, *Fortune* y *New Republic*. Trabajó como editora científica en *Time* y como redactora jefa en *Scientific American Mind*.



ILUSTRACIÓN: FATINHA RAMOS

PLANETA ALIMENTACIÓN

EL PODEROSO ALETEO DE UNA MARIPOSA EN EL SIGLO XXI

Jaime Martínez Valderrama | La simplificación de los ecosistemas aumenta su productividad pero los hace más vulnerables a los fenómenos globales

El proverbio, de origen chino, reza así: «El aleteo de las alas de una mariposa se puede sentir al otro lado del mundo». Aunque la idea que porta este aforismo pretende resaltar que todos los acontecimientos están relacionados unos con otros, su atracción radica en la concepción moderna del principio, conocida como «efecto mariposa». Nos seduce la idea de que hechos nimios sean el origen de grandes catástrofes, que el suave batir de las alas de una mariposa en Hong Kong se convierta en un ciclón en Florida. La concatenación de causas y efectos a lo largo de miles de kilómetros es tan perversa como fascinante.

La teoría del caos de Edward Lorenz desarrolla esta metáfora hasta convertirla en ecuaciones. Una de las principales implicaciones del caos es la impredecibilidad. Pequeños cambios en las condiciones iniciales llevan a resultados dispares, lo que dificulta, por ejemplo, la predicción meteorológica. Sin embargo, la impredecibilidad no es sinónimo de inestabilidad. En efecto, los sistemas complejos (los ecosistemas, el cuerpo humano, la atmósfera, los océanos) cuentan con numerosos mecanismos disipadores de estos «gérmenes de caos». Esta faceta estabilizadora hace que el caos siga siendo más propio de juegos matemáticos que una posibilidad real. Al menos hasta ahora.

Inmersos en la tercera década del s. XXI, la versión más extrema del proverbio chino se está haciendo realidad. Cada vez es más probable que el aleteo de una mariposa se convierta en tempestad. Hay dos razones para explicar esta deriva. En primer lugar, el «batido de las alas» tiene una velocidad de propagación nunca antes vista. En el s. XVII, a pesar del enorme interés europeo por las especias, las mercancías tardaban meses en llegar a su destino y en un volumen que no colmaba la demanda. Se tardó siglos en cultivarlas en Europa y así bajar sus costes y extender su consumo a toda la población. Ahora, en cambio, basta un tuit de un famoso para que su mensaje empiece a remover tierra a miles de kilómetros al día siguiente. Veamos algunos ejemplos. Si la dieta depurativa (*detox*) se pone de moda, el cultivo masivo de frambuesas y arándanos se produce en los lugares más insospechados. Si en China ocurre un brote de peste africana que hunde su producción de carne de cerdo, la oportunidad para cubrir esa ingente demanda provoca que España se convierta en el principal productor de carne de cerdo de la UE. Las macrogranjas porcinas surgen como setas, y millones de toneladas de soja se importan de Sudamérica para producir los piensos que alimentan a esos cerdos *made in Spain* con destino a China. Ha bastado una señal de la economía China para poner patas arriba territorios que están a miles de kilómetros, como Balsa de Ves, un pueblo albaceteño

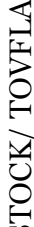


que se opone a que lo inunden de purines, o el Chaco paraguayo, donde un estanciero no duda en arrasar miles de hectáreas para hacerse millonario. Antes, la avaricia avanzaba a golpe de hachazo y sierra: tumbar una selva llevaba el tiempo suficiente como para darse cuenta de que no era una buena idea. Ahora los avances técnicos no dan cabida a la reflexión. Es dicho y hecho.

El sutil aleteo de nuestra mariposa se asemeja hoy al soplo de cientos de potentes ventiladores. La inmediata causalidad entre ideas y acción encierra paradojas que constituyen el fiel reflejo de una sociedad compulsiva. Los miles de aerogeneradores sembrados aquí y allá con el fin de aprovechar el viento y rebajar nuestra huella de carbono, resulta que han liquidado media selva ecuatoriana. Sus aspas están hechas de madera de balsa y el furor por la energía sostenible ha promovido la tala de una selva primaria que, creía, vivía al margen de la glotona globalización. Cuando el aleteo de la mariposa arranca, no se sabe muy bien cuáles serán sus consecuencias. La moda por la quinua, por la dieta vegana o por otros muchos productos saludables y con el marchamo de «ecológicos», tienen consecuencias absolutamente imprevistas. Eso es caos.

La segunda razón para explicar los efectos devastadores que puede tener un hecho aparentemente trivial, acaecido a miles de kilómetros, es que hemos eliminado los cortafuegos que nos protegían de esos episodios potencialmente caóticos. La simplificación de los agrosistemas ofrece un claro ejemplo de ello. Cuando todo se fía a un único cultivo (incluso una única variedad), la probabilidad de que una plaga o un evento climático acabe con la cosecha es más alta que si se diversifican los cultivos (unos más resistentes a las sequías, otros más productivos, otros más adaptados al frío, etcétera). Aunque esta diversificación pena-

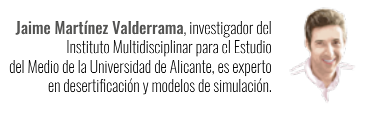
Tres son los ingredientes de la pócima que puede sacarnos de esta encrucijada: sentido común, un modo de vida que se desprenda de la inmediatez y valores que vayan más allá del dinero



liza la producción potencial, cortocircuita las opciones de colapso. La explotación masiva de recursos que no reserva una parte para otros servicios ecosistémicos (como puede ser la propia regeneración de ese recurso) constituye otro ejemplo. Un acuífero puede recargarse a partir de los adyacentes, pero si todos se hallan sometidos al mismo ritmo de extracción, todos sufrirán problemas de recarga; desaparecen los territorios «improductivos» que hacían de soporte a los productivos. Por último, otro ejemplo de pérdida de barreras que nos protegían del caos nos lo deja la pandemia de COVID-19. En palabras de Fernando Valladares, investigador del Museo Nacional de Ciencias Naturales del CSIC y experto en los efectos del cambio climático en la biosfera «solo una naturaleza rica y funcional podrá amortiguar los impactos de futuras pandemias». A medida que simplificamos la biodiversidad del planeta, su efecto protector por dilución, que ya ha sido demostrado para diversas enfermedades, desaparece [*véase* «Los factores ecológicos en las epidemias», por Jaume Terradas; *Investigación y Ciencia*, noviembre de 2020].

Nos encontramos atrapados en una dinámica compleja y peligrosa. Cada vez más, nos hallamos a merced de los bofetones meteorológicos y económicos que genera el cambio global y se propagan sin freno a través de una naturaleza simplificada y puesta al servicio del ser humano. Lejos de ser perfecto, el mundo de hace unas décadas, donde las cosas ocurrían de forma gradual, era mucho más estable y seguro para la viabilidad de las diversas especies que lo habitaban, incluida la nuestra. Más allá de las soluciones técnicas, el dilema que se plantea recae en el plano ético. A mi modo de ver, tres son los ingredientes de la pócima que puede sacarnos de esta encrucijada: sentido común, un modo de vida que se desprenda de la inmediatez y valores que vayan más allá del dinero.

Jaime Martínez Valderrama, investigador del Instituto Multidisciplinar para el Estudio del Medio de la Universidad de Alicante, es experto en desertificación y modelos de simulación.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas

EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Javier Grande Bardanca, Yvonne Buchholz

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

PRODUCCIÓN

InboundCycle
Plaza Francesc Macià, 8-9, 7B
08029 Barcelona (España)
Teléfono 936 116 054

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

ASESORAMIENTO Y TRADUCCIÓN:

Andrés Martínez: *Apuntes* y *Los peculiares cuerpos fructíferos de los mohos mucilaginosos*; **José Óscar Hernández Sendín:** *Apuntes, Las 10 técnicas emergentes más prometedoras del momento* y *Algoritmos, espías de las emociones*; **Miguel A. Vázquez-Mozo:** *Choques galácticos*; **Gonzalo Claros:** *Las 10 técnicas emergentes más prometedoras del momento* y *El lenguaje molecular de las células*; **Ana Mozo:** *Con los antibióticos, casi siempre menos es más*; **Fabio Teixidó:** *Superfulguraciones solares.*

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF
Laura Helmuth

PRESIDENT
Kimberly Lau

EXECUTIVE VICE PRESIDENT
Michael Florek

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:
1 año 75€ / 2 años 140€

La suscripción incluye el acceso completo a la hemeroteca digital (todos los números publicados desde 1976).

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665



METEOROLOGÍA ESPACIAL

SUPERFULGURACIONES SOLARES

Jonathan O'Callaghan | Aunque el Sol es una estrella tranquila, parece haber sacudido nuestro planeta con varias erupciones enormes en un pasado no muy lejano. ¿Podría ocurrir otra dentro de poco?

En ocasiones, el Sol emite enormes chorros de partículas y radiación que pueden causar estragos en la Tierra. Durante más de 150 años, los científicos que estudian tales estallidos y sus efectos en nuestro planeta se han centrado en el que parecía el ejemplo por antonomasia: el evento de Carrington de 1859. Aquel año, una erupción solar alcanzó la Tierra e inyectó suficiente energía en su campo magnético como para desatar una potente tormenta geomagnética, que creó hermosas auroras, pero también provocó incendios en las líneas de telégrafo. La tormenta causó daños limitados en la infraestructura eléctrica de la época, por lo que se consideró un inconveniente menor. Pero hoy los investigadores contemplan el evento de Carrington, junto con otra tormenta de intensidad similar acaecida en 1921, como una inquietante advertencia de posibles catástrofes futuras.

El primer indicio de que las tormentas solares podían ser aún más virulentas llegó en 2012, cuando se descubrió que en torno al año 775 tuvo lugar una gigantesca tormenta entre diez y cien veces más intensa que el evento de Carrington. «Fue verdaderamente asombroso», señala Nicolas Brehm, de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich. «No pensábamos que pudiera ocurrir algo de tal magnitud.»

Los expertos aventuraron que esa antigua tormenta pudo deberse a una «superfulguración», un evento miles de veces más potente que una erupción solar típica y que se produciría en nuestra estrella una vez cada 10.000 años. Si una de esas superfulguraciones nos alcanzara de lleno, las consecuencias para nuestra sociedad globalmente conectada serían devastadoras.

Y esos fenómenos parecen más comunes de lo que se pensaba: los investigadores que estudian los registros geoquímicos de la historia reciente de la Tierra han hallado indicios de otros dos episodios similares.

Un trabajo dirigido por Brehm, que se halla en fase de revisión para su publicación en *Nature Communications*, anuncia el posible descubrimiento de dos estallidos solares tremendamente intensos. Uno se habría producido en el año 7176 a.C., cuando las sociedades nómadas de cazadores-recolectores daban paso a los asentamientos agrícolas, y el otro en 5259 a.C., mientras el planeta salía de la última glaciación. Se cree que ambos episodios fueron al menos tan potentes como el del año 775. Los expertos se han pasado el último decenio buscando eventos extremos similares al del siglo VIII, pero Brehm y sus colaboradores son los primeros en hallar uno. «Se trata de un gran logro», valora Fusa Miyake, investigadora de la Universidad de Nagoya que en 2012 lideró el estudio que desveló la tormenta de 775. Los científicos se refieren ahora a esas superfulguraciones como «eventos de Miyake».

Los investigadores buscan esas erupciones solares mediante análisis químicos de diversas muestras, procedentes de los casquetes polares y de árboles antiguos conservados en ciénagas anegadas o en lo alto de las montañas. Cuando las partículas solares alcanzan la atmósfera, generan isótopos radiactivos de distintos elementos, los cuales se acumulan en esos lugares. Por ejemplo, la actividad del Sol puede formar carbono 14, que es absorbido por los árboles a medida que crecen. Dado que cada anillo del tronco de un árbol corresponde a un solo año de crecimiento, los científicos pueden datar de forma muy precisa cualquier pico en la concentración del isótopo causado por un aumento de la actividad solar: cuanto más carbono 14 contenga un anillo, más partículas solares incidían sobre nuestra atmósfera en ese momento.

NASA, OBSERVATORIO DE DINÁMICA SOLAR Y EQUIPOS CIENTÍFICOS DE LOS INSTRUMENTOS AIA, EVE Y HMI (*todas las fotografías*)

EN SÍNTESIS

Las superfulguraciones son enormes explosiones estelares, miles de veces más potentes que una erupción solar típica, que generan grandes chorros de partículas y radiación.

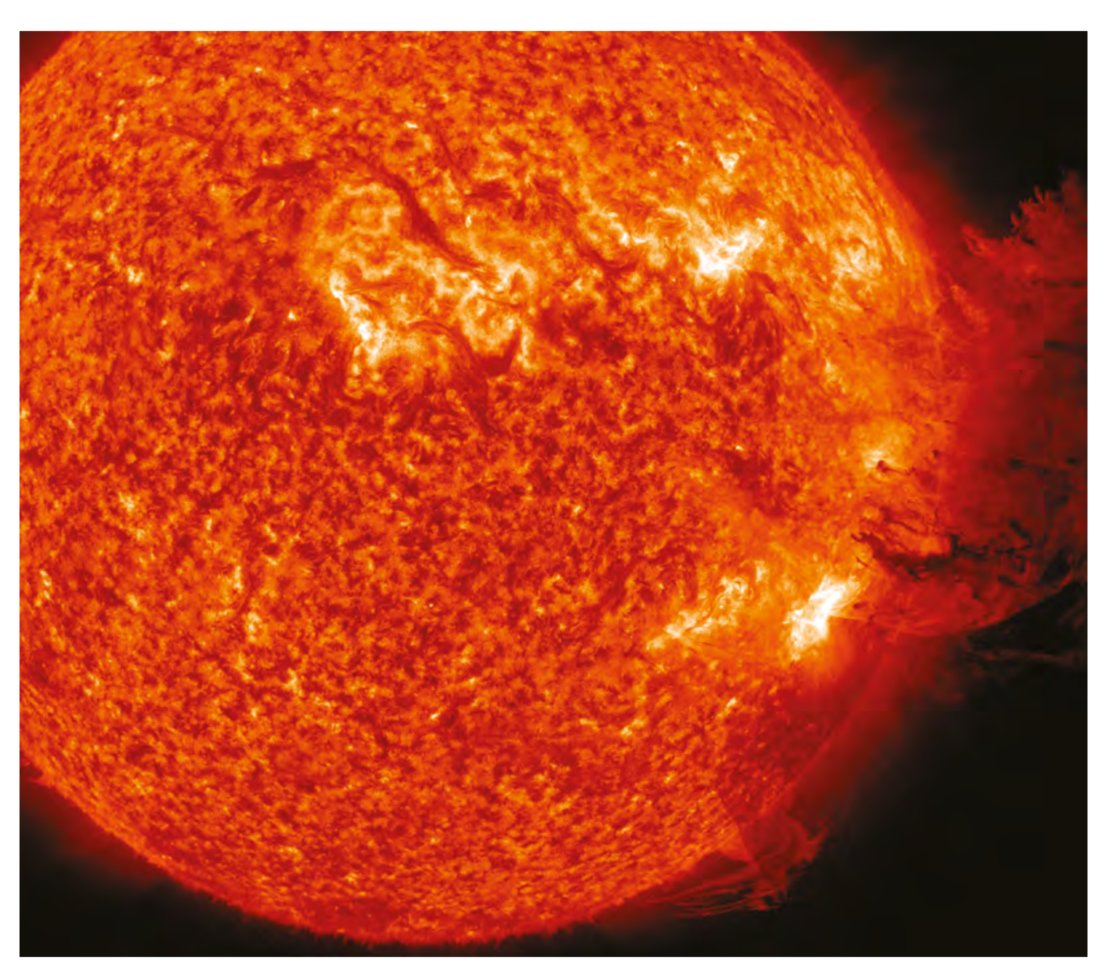
Los análisis isotópicos en anillos de crecimiento y testigos de hielo muestran que la Tierra se ha visto sacudida por al menos tres superfulguraciones solares en los últimos 10.000 años.

Las tormentas geomagnéticas que acompañan a tales eventos representan una amenaza para nuestra sociedad globalmente conectada, que podemos tratar de prevenir vigilando la actividad solar.

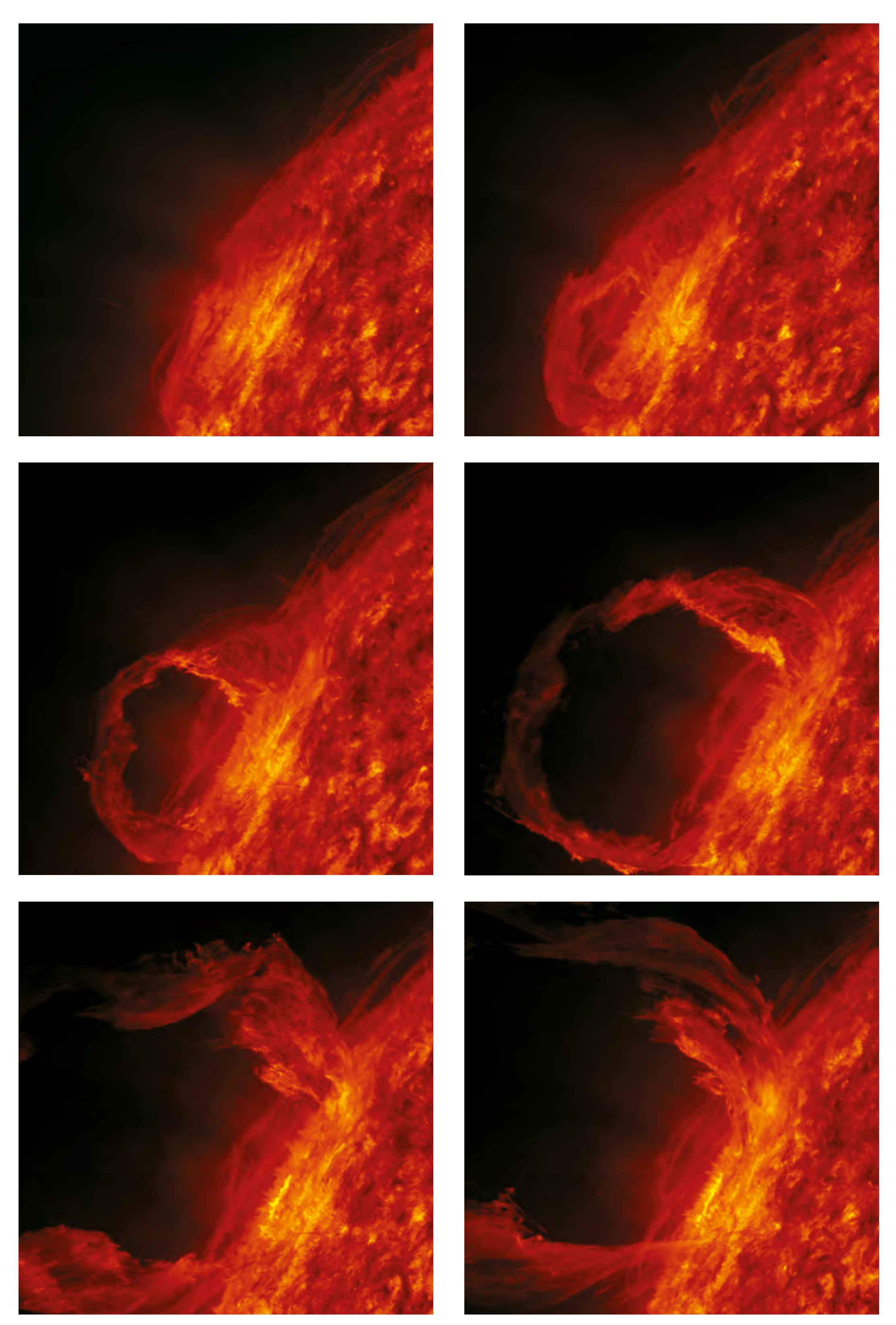
Los anillos de crecimiento «nos permiten reconstruir los niveles de radiocarbono a lo largo del tiempo», explica Charlotte Pearson, dendrocronóloga del Laboratorio de Investigación de Anillos de Árboles de la Universidad de Arizona y coautora del artículo de Brehm. «La actividad del Sol es uno de los principales factores detrás de esas fluctuaciones.»

El estudio de la concentración de berilio 10 y cloro 36 en testigos de hielo permite realizar mediciones similares, si bien algo menos precisas. Y la combinación de ambos métodos puede ayudarnos a tejer un relato preciso de los acontecimientos históricos. Poseemos datos de anillos de crecimiento para la mayor parte del Holoceno (nuestra época geológica actual, que comenzó hace unos 12.000 años), pero inspeccionarlos en busca de picos de carbono 14 es un proceso lento: explorar un solo año requiere semanas de análisis y correlaciones entre diversas muestras de anillos. «El Holoceno abarca 12.000 años y hemos examinado el 16 por ciento», afirma Alexandra Bayliss, jefa de datación científica de Historic England (organismo público dedicado a la preservación del patrimonio histórico de Inglaterra) y coautora del artículo. «Es una cuestión de tiempo y dinero.»

La suerte se alió con Brehm y su equipo. En el caso del evento del año 7176 a.C., primero apreciaron indicios de un pico de berilio 10 en los testigos de hielo. A continuación, estudiaron los anillos de los árboles y hallaron el correspondiente pico de carbono 14. En cuanto al episodio de 5259 a.C., Bayliss había advertido una laguna en los datos arqueológicos en torno a ese período. Al analizar el contenido en carbono 14 de los anillos de crecimiento de la época, el equipo observó otro pico. «Encontra-



Emisión de una fulguración y grandes cantidades de plasma en una región solar de intensa actividad.

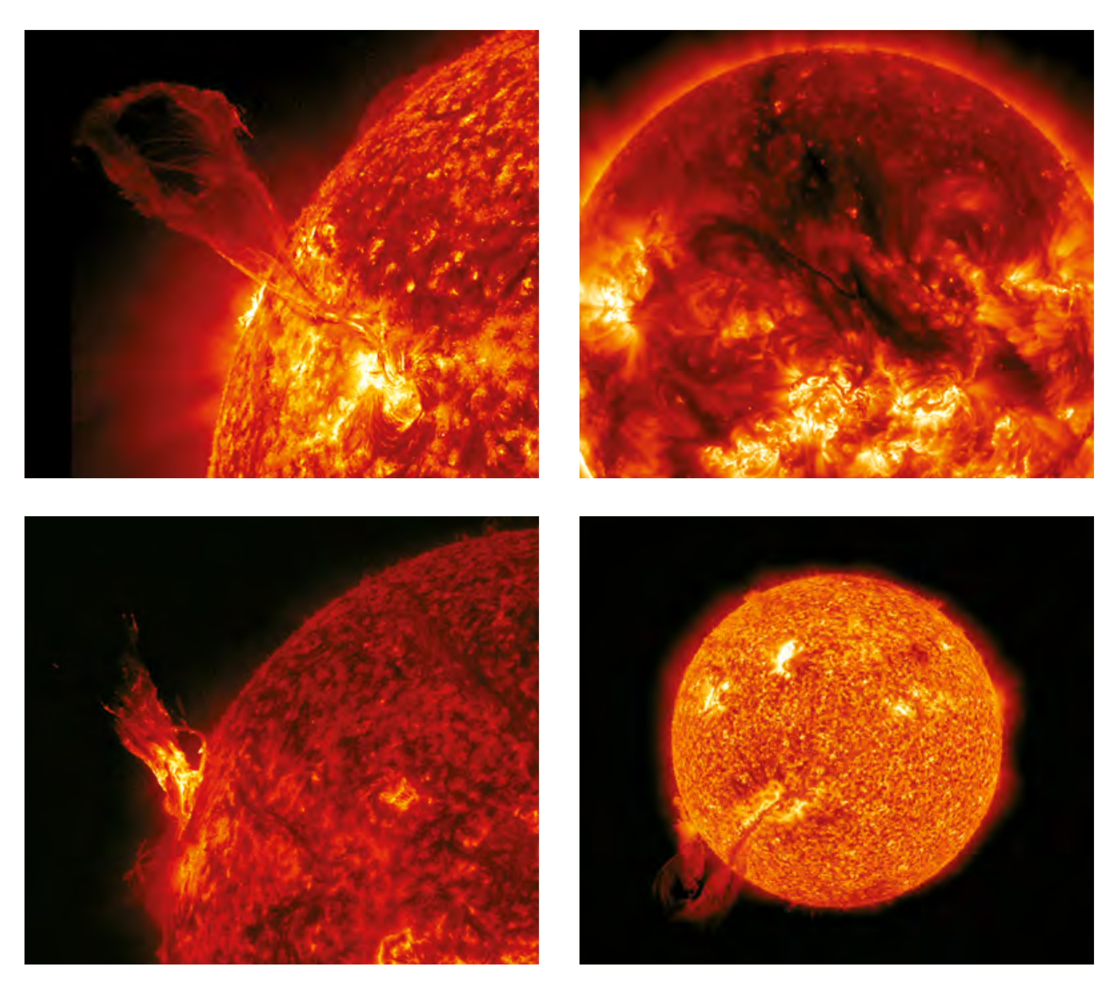


La erupción de esta protuberancia solar, mucho mayor que un planeta, liberó enormes cantidades de materia y radiación.

mos aumentos muy acusados» en ambas fechas, apunta Brehm, de una magnitud similar a los que halló Miyake en las muestras que revelaron el evento del año 775.

Cuando Miyake y su equipo presentaron sus resultados en 2012, los científicos no se ponían de acuerdo sobre la causa de los picos. Algunos incluso consideraban poco probable que guardaran relación con las erupciones solares. Pero un estudio de 2013 dirigido por Brian Thomas, de la Universidad Washburn, demostró que las fulguraciones eran las principales sospechosas. «Hubo quien propuso que [el pico de 775] podía deberse a una supernova o incluso a un estallido de rayos gamma», rememora Thomas, que no participó en el reciente trabajo de Brehm y sus colaboradores. «Pero esos fenómenos son demasiado infrecuentes. No encajan tan bien como la hipótesis del origen solar.» Lo más probable, sostiene Thomas, es que esos picos tan acusados correspondieran a un incremento de la actividad solar, posiblemente acompañado de una tormenta geomagnética similar a la de Carrington, pero mucho más potente. Bayliss subraya que «el evento de Carrington ni siquiera se aprecia» en los anillos de crecimiento y los testigos de hielo, por lo que, en comparación, su magnitud habría sido minúscula.

Con todo, sigue sin quedar clara la relación entre los picos de partículas solares y la intensidad de la tormenta geomagnética resultante. «A menudo se asocia la llegada de un gran número de partículas con una tormenta geomagnética, pero eso no tiene por qué ser así», puntualiza Thomas. Incluso puede que las tormentas geomagnéticas como la de Carrington no generen picos de carbono 14, lo que explicaría que no la hayamos detectado en los anillos de crecimiento ni en los testigos de hielo. Sin embargo, existen indicios de que el evento del



Un agitado remolino de campos magnéticos retorcidos impulsa los estallidos que definen el ciclo de actividad solar de 11 años.

año 775 vino acompañado de intensas auroras registradas en China, lo que apunta a la ocurrencia de una fuerte tormenta geomagnética junto a la irrupción masiva de partículas solares. «Es más prudente suponer que todos esos eventos fueron grandes tormentas geomagnéticas», sentencia Thomas.

Si esa asociación es correcta, eso implicaría que la Tierra se ha visto sacudida por al menos tres superfulguraciones solares en los últimos 10.000 años. (Puede que en el futuro se descubran más en ese 84 por ciento de datos dendrocronológicos donde aún no se han buscado picos de carbono 14.) «No parecía demasiado realista que solo se hubiera producido una [superfulguración] en los últimos 10.000 años», indica Pearson, «aunque hasta ahora cabía la posibilidad de que hubiera sido un evento puntual. Haber hallado otras dos no me parece sorprendente, aunque quizá sí sea preocupante».

Y es que, de producirse hoy en día, un episodio de ese tipo podría resultar devastador para los satélites en órbita y las infraestructuras terrestres. En marzo de 1989, una tormenta geomagnética mucho más débil que el evento de Carrington provocó un apagón de 12 horas en Quebec al sobrecargar la red eléctrica de toda la provincia. En la actualidad, lo más probable es que una tormenta geomagnética asociada a un evento de Miyake tuviera efectos mucho más generalizados, como averías potencialmente catastróficas en la red de suministro eléctrico y los satélites.

Sangeetha Abdu Jyothi, de la Universidad de California en Irvine, ha calculado recientemente que una tormenta similar al evento de Carrington podría incluso ocasionar un «apocalipsis de Internet». Las partículas energéticas de una tormenta así podrían inutilizar los cables submarinos que se extienden entre países e interrumpir el tráfico mundial de Internet durante semanas o incluso meses. Solo en Estados Unidos, un desastre de ese tipo podría costar 7000 millones de dólares al día, según las estimaciones de Abdu Jyothi. Algo aún más intenso, como un evento de Miyake, causaría daños casi incalculables. «Seguramente podríamos recobrarnos de un episodio parecido al de Carrington, porque no borraría nuestros datos», opina Abdu Jyothi. «Con un evento diez o cien veces más potente, ya no estoy tan segura. No creo que nadie lo haya simulado, y sospecho que provocaría una gran pérdida de datos. Podrían desaparecer todos nuestros registros, los datos bancarios e información sanitaria esencial, y no habría forma de recuperarlos.»

Si nos alcanzara de lleno una superfulguración, las consecuencias podrían ser devastadoras

Por el momento, la perspectiva de que nuestra civilización se vea abocada a una «edad oscura» debido a un evento de Miyake parece remota. Pero algunos cálculos sugieren que la probabilidad de que se produzca un episodio como el de Carrington en la próxima década podría ser de hasta un 12 por ciento. Podemos prepararnos para una erupción de esa magnitud vigilando la actividad solar, con el fin de apagar los satélites y las redes eléctricas antes de que llegue la fulguración y la posterior tormenta geomagnética. Pero protegernos de un evento de Miyake tal vez resulte más difícil.

Entretanto, los científicos siguen hallando pruebas de otros eventos solares extremos en los anillos de crecimiento de los árboles antiguos y en los testigos de hielo. «Estamos empezando a percatarnos de que el Sol puede ser mucho más energético y activo de lo que pensábamos», concluye Thomas. «Cuando estudiábamos estas superfulguraciones en otras estrellas, uno de los debates era si podrían tener lugar en el Sol. Y a la luz de los registros históricos, parece que sí es posible.»

Jonathan O'Callaghan es periodista científico especializado en vuelos espaciales comerciales, exploración espacial y astrofísica.



EN NUESTRO ARCHIVO

Tormentas espaciales. James L. Burch en *IyC*, junio de 2001.
El origen de las fulguraciones solares. Gordon D. Holman en *IyC*, julio de 2006.
Supertormenta solar. Sten F. Odenwald y James L. Green en *IyC*, octubre de 2008.



INTELIGENCIA ARTIFICIAL

ALGORITMOS, ESPÍAS DE LAS EMOCIONES

John McQuaid | Las empresas tecnológicas analizan nuestros sentimientos en las entrevistas de trabajo y los espacios públicos mediante inteligencia artificial. Pero esta tiende a incurrir en sesgos raciales, culturales y sexuales

En una feria celebrada en Liverpool en febrero de 2020, dedicada al poco glamuroso tema de las compras gubernamentales, los asistentes deambulaban entre los expositores y las muestras de los proveedores deteniéndose en algunos y pasando de largo ante otros. Entretanto eran vigilados de cerca: instaladas discretamente por todo el recinto, 24 cámaras seguían los movimientos de cada individuo, observando sus reacciones a lo que veían y catalogando las sutiles contracciones de los músculos faciales a una velocidad de entre cinco y diez fotogramas por segundo. Las imágenes se enviaban a una red de ordenadores, donde una serie de algoritmos de inteligencia artificial determinaban el sexo y la edad aproximada de cada persona y analizaban sus expresiones en busca de señales de «satisfacción» o «interés».

Un año después del evento de Inglaterra, Panos Moutafis, director ejecutivo de Zenus, la empresa tejana con sede en Austin que ha creado esta tecnología, continuaba entusiasmado por los resultados. «No he visto muchos sistemas comerciales que consigan ese grado de precisión», me dijo durante una videollamada mientras me enseñaba una fotografía de la multitud, cuyos rostros aparecían enmarcados por recuadros. El sistema había aprendido a reconocer las emociones después de que los ingenieros de Zenus lo entrenaran introduciendo en él un enorme conjunto de datos de expresiones faciales con etiquetas que describían los sentimientos pertinentes. La empresa validó la eficacia del programa con varios procedimientos, tales como ensayos reales con personas que referían cómo se sentían en el momento de tomar la imagen. Según Moutafis, el sistema «funciona tanto en interiores, con mascarillas y en condiciones de poca luz, como en exteriores, con personas que llevan sombrero o gorra y gafas de sol».

La de Zenus constituye un ejemplo de tecnología reciente, denominada inteligencia artificial (IA) emocional o computación afectiva, que combina programas de inteligencia artificial con cámaras y otros dispositivos que captan la expresión facial, el lenguaje corporal y la entonación, entre otras señales. El objetivo es trascender el simple reconocimiento facial con el afán de revelar cualidades que hasta el presente resultaban imperceptibles para la tecnología: los sentimientos, la motivación y la actitud de quienes aparecen en las imágenes. «Hasta ahora las cámaras eran mudas, pero se están volviendo inteligentes. Están adquiriendo la capacidad no solo de registrar calladamente nuestras acciones, sino también de emitir juicios sobre ellas», asevera el analista político de la Unión Estadounidense por las Libertades Civiles, Jay Stanley, autor del informe de 2019 The dawn of robot surveillance («Los albores de la vigilancia robótica»).

La IA emocional se ha convertido en una herramienta popular en los estudios de mercado —en otra feria, Zenus mostró a los hoteles Hilton que una actividad con cachorros y helados que organizaba la cadena resultaba más atrayente que la barra libre del evento—, pero su alcance se extiende a áreas en las que hay mucho más en juego. Se están usando o probando sistemas capaces de interpretar los gestos y ademanes que denotan los sentimientos, el carácter y las intenciones de una persona con variados fines: detectar amenazas en los puestos de control fronterizos, evaluar a los candidatos a un puesto de trabajo, vigilar las aulas en busca de señales de aburrimiento o mala conducta, o reconocer los indicios de conducción temeraria al volante, entre otros. Los principales fabricantes de automóviles pla-

JUAN MABROMARA, AFP Y GETTY IMAGES (*página anterior*)

EN SÍNTESIS

La inteligencia artificial ya ha traspasado el reconocimiento facial y se adentra en la identificación de los sentimientos, las motivaciones y las actitudes a través del análisis de la expresión facial y corporal y del discurso.

Existe el riesgo de que los diseñadores introduzcan inadvertidamente sesgos de índole racial, étnica, sexual o cultural en el proceso de aprendizaje de tales programas, que no siempre emitirían juicios acertados.

Esas capacidades incipientes suscitan un vivo debate en torno a la ética y la legalidad de la intromisión en la intimidad más profunda, la del pensamiento.



DE DENTRO AFUERA: Algunos sistemas de IA emocional se basan en el trabajo del psicólogo Paul Ekman, quien sostiene que las expresiones faciales universales revelan sentimientos entre los que figuran (*de izquierda a derecha*) la tristeza, la alegría, la ira, el miedo y la sorpresa.

PAUL EKMAN

nean integrar estos sistemas en las próximas generaciones de vehículos, mientras Amazon, Microsoft o Google, entre otras compañías, ofrecen ya servicios de IA emocional alojados en la nube, a menudo junto con programas de reconocimiento facial. Decenas de empresas emergentes han lanzado aplicaciones que ayudan en los procesos de selección de personal. En Corea del Sur esta práctica se ha generalizado tanto que los orientadores laborales aconsejan a menudo a sus clientes que ensayen las entrevistas con una interfaz de inteligencia artificial.

Los sistemas de IA se sirven de datos de diversa índole para generar información sobre las emociones y la conducta. Además de la expresión facial, la entonación, el lenguaje corporal y la forma de andar, son capaces de analizar el contenido del discurso hablado o escrito con el fin de descubrir afectos y actitudes. Algunas aplicaciones emplean los datos que recopilan para indagar no en las emociones, sino en otros aspectos relacionados, como el tipo de personalidad que se tiene, si se presta atención o no o las posibles amenazas que la persona en cuestión pueda representar.

Por otro lado, los críticos advierten de que el alcance de la IA emocional ha traspasado los límites hasta extremos peligrosos. Los algoritmos de IA pueden ser entrenados con datos que encierren prejuicios raciales, étnicos y de sexo, lo cual afectará de manera negativa a las evaluaciones; perjudicará, por ejemplo, a los candidatos a un puesto de trabajo que no sean blancos. «Existe el convencimiento de que podemos trasvasar ciertos procesos cognitivos humanos a estos sistemas», indica Lauren Rhue, profesora de sistemas de la información en la Universidad de Maryland, que ha estudiado los sesgos raciales existentes en la IA emocional. «La convicción de que basándonos en lo que interpreta un algoritmo podemos afirmar: “Oh, oh. Esta persona se comporta de un modo amenazador”. Ahí es donde nos adentramos en terreno peligroso».

Los fundamentos científicos en que descansan también se han puesto en tela de juicio. Numerosas aplicaciones de IA emocional tienen su origen en las investigaciones llevadas a cabo hace medio siglo por los psicólogos Paul Ekman y Wallace Friesen, quienes plantearon que solo un número reducido de expresiones faciales corresponden a emociones básicas (ira, repugnancia, miedo, alegría, tristeza y sorpresa; más tarde, Ekman incorporó a la lista el desprecio) y que dichas expresiones componen un lenguaje emocional entendido universalmente. En la actualidad, empero, estas ideas suscitan controversia debido a las notables diferencias culturales e individuales que parecen existir en la gestualidad facial. Numerosos investigadores sostienen que los algoritmos son incapaces, al menos por ahora, de interpretar de forma invariable las sutilezas de las expresiones huma-

nas en distintos individuos, las cuales quizá no coincidan con los sentimientos estereotipados que encierran en su fuero interno. El propio Ekman, que colaboró en el desarrollo de las primeras técnicas de reconocimiento de emociones, aboga por una rigurosa reglamentación de esta tecnología, pues la considera una grave amenaza para la intimidad.

La IA emocional no es intrínsecamente mala. Según los expertos, si se consiguiera entrenar a las máquinas para que descifraran de un modo fiable las emociones y el comportamiento, tendría un enorme potencial en sectores como la robótica, la atención sanitaria y la automoción, entre otros. Sin embargo, la situación actual se asemeja a una batalla campal cuyo desenlace podría derivar en la difusión de una tecnología insuficientemente probada antes de que la sociedad tenga tiempo de calibrar los posibles costes.

EN 2018, MARK GRAY, por entonces vicepresidente de recursos humanos y operaciones comerciales de Airtame, un fabricante de dispositivos para duplicar pantallas y compartir presentaciones, buscaba perfeccionar los procesos de selección de personal. La eficiencia era uno de los aspectos que debía mejorarse. Con un centenar de empleados repartidos en sus sedes de Copenhague, Nueva York, Los Ángeles y Budapest, la empresa recibe cientos de solicitudes a puestos en los departamentos de *marketing* o diseño. Otro factor radica en la naturaleza caprichosa de las decisiones. «Muchas veces da la impresión de que vienen dictadas por una voz interior falsa, que te dice: "vale, este candidato me cae bien" en vez de "este candidato está más cualificado"», admite Gray, que ahora trabaja en Proper, una tecnológica danesa que se especializa en gestión inmobiliaria. «En el ámbito de los recursos humanos y la selección de personal, donde abunda lo intangible, quería saber cómo incorporar un aspecto tangible al proceso.»

Airtame contrató a Retorio, una empresa de Múnich que aplica la inteligencia artificial en las videoentrevistas. El proceso es rápido: los candidatos a un puesto han de contestar a tan solo dos o tres preguntas y grabar las respuestas, que no deben exceder los 60 segundos. Un algoritmo analiza las expresiones faciales y la voz de los entrevistados, junto con una transcripción de las respuestas. A continuación, genera un perfil basado en cinco rasgos básicos de la personalidad, un modelo común en psicología que se abrevia como OCEAN, siglas en inglés de: apertura a la experiencia, voluntad, extroversión, sensibilidad a las relaciones personales y neuroticismo. Los seleccionadores reciben una lista de los candidatos ordenados en función de la adecuación de cada perfil al puesto.

Este tipo de programas ha empezado a influir en la toma de las decisiones empresariales y en el trato a las personas por parte de las organizaciones. En Airtame, la modificación de los procesos de selección ha permitido encumbrar en el acto a algunos candidatos por encima de otros. Según Gray, es fruto de que la evaluación de perfiles funciona, y se reafirma con un gráfico que muestra la concordancia entre la productividad y las ventas obtenidas por varios empleados contratados recientemente y sus puntuaciones de personalidad. Asegura que los mejores habían obtenido mayores valoraciones en los rasgos de voluntad, sensibilidad a las relaciones personales y apertura.

Las máquinas capaces de entender las emociones han protagonizado desde hace bastante tiempo relatos de ciencia ficción. Sin embargo, en ingeniería y ciencias de la computación, el afecto humano se consideraba un concepto ajeno a la disciplina. En la década de 1990, continuaba siendo «un tabú, una cualidad no deseada», puntualiza Rosalind Picard, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, que acuñó el término «computación afectiva» en un informe técnico de 1995. «La gente me tachaba de loca, excéntrica o ingenua; les daba vergüenza. En cierta ocasión, una respetada persona del campo del procesamiento de señales y del lenguaje se acercó a mí y, sin apartar la mirada del suelo en ningún momento, me dijo: "Estás perdiendo el tiempo, las emociones no son más que ruido".»

Picard y otros investigadores empezaron a diseñar herramientas capaces de leer la información biométrica que denotaba estados emocionales y de responder automáticamente a ella; dicha información abarcaba desde las expresiones faciales hasta el flujo sanguíneo. No obstante, la actual proliferación de aplicaciones surge de la creciente implantación, iniciada a principios de la década de 2010, del aprendizaje profundo, una potente forma de aprendizaje automático que emplea redes neuronales, cuya modelización se inspira a grandes rasgos en el cerebro. El aprendizaje profundo ha aumenta-





EL CONTEXTO IMPORTA: Una mujer parece disgustada en una foto recortada de 1964 (*izquierda*). En cambio, la imagen completa muestra que forma parte de una multitud alborozada (*arriba*). Son fans eufóricas de los Beatles ante el hotel neoyorquino donde se alojaba el grupo.

JOHN PEDIN, NY DAILY NEWS ARCHIVE Y GETTY IMAGES

do la potencia y la precisión de los algoritmos de IA, de modo que ya es posible automatizar tareas que antes solo las personas podían desempeñar de una manera fiable: conducir un vehículo, reconocer una cara o analizar ciertos escáneres médicos.

Estos sistemas aún distan de ser perfectos y la IA emocional se enfrenta a un reto formidable. Los algoritmos se diseñan para reflejar una «verdad fundamental» sobre el mundo: no deben confundir una manzana con un melocotón, por ejemplo. En el aprendizaje automático, «aprender» consiste en comparar repetidas veces datos brutos —a menudo procedentes de fotografías, pero también de otras fuentes, como vídeos y audios— con datos de entrenamiento etiquetados con la característica deseada. De este modo, el sistema aprende a extraer los elementos comunes subyacentes, la «manzanidad», por así decirlo, presente en las fotografías. Una vez concluido el entrenamiento, el algoritmo conseguirá reconocer las manzanas que aparezcan en cualquier imagen.

Ahora bien, cuando se trata de identificar cualidades difíciles de definir, como la personalidad o los sentimientos, la verdad fundamental se torna inalcanzable. ¿Qué aspecto tienen la «alegría» o el «neuroticismo»? Los algoritmos de IA emocional no son capaces de intuir de forma directa los sentimientos, la personalidad o las intenciones. En su lugar, se entrenan mediante una suerte de colaboración abierta distribuida para imitar los juicios que unas personas emiten sobre otras. Los críticos argumentan que este método introduce demasiadas variables subjetivas. «Existe una marcada discrepancia entre lo que estas cosas nos muestran y lo que quizá esté pensando o sintiendo una persona. Y ese es el peligroso salto que varias de esas tecnologías han empezado a dar», advierte Kate Crawford, de la Escuela de Comunicación y Periodismo Annenberg, que estudia las consecuencias sociales de la inteligencia artificial.

El proceso que genera esos juicios de valor es complicado y cada etapa encierra sus propios escollos. El aprendizaje profundo devora cantidades ingentes de datos. Y la IA emocional precisa conjuntos de entrenamiento que combinan miles, a veces miles de millones, de juicios humanos: imágenes de personas etiquetadas como «alegres» o «sonrientes», por ejemplo. Ahora bien, los algoritmos corren el riesgo de asimilar inadvertidamente los sesgos colectivos y sistemáticos de los recopiladores de datos de carne y hueso. Esta desviación puede provenir de un conjunto de entrenamiento que carezca de suficiente diversidad sociodemográfica o de las actitudes inconscientes de los etiquetadores, entre otras fuentes.

Tampoco es nada sencillo reconocer una son-

risa. En un estudio llevado a cabo en 2020 por Carsten Schwemmer, del Instituto Leibniz de Ciencias Sociales de Colonia, y sus colaboradores, pasaron fotografías de los miembros del Congreso estadounidense a través de las aplicaciones de reconocimiento de emociones ubicadas en la nube de Amazon, Microsoft y Google. Si bien los resultados indicaban que el 86 por ciento de los hombres y el 91 por ciento de las mujeres sonreían, los algoritmos manifestaban una tendencia evidente. Google Cloud Vision, por ejemplo, asignó la etiqueta «sonrisa» a más del 90 por ciento de las féminas, pero a menos del 25 por ciento de los varones. Los autores señalaron la posible existencia de un sesgo de sexo en los datos de entrenamiento. Asimismo, al revisar las imágenes, hallaron con frecuencia gestos ambiguos, que las máquinas ignoraban: «Muchas expresiones faciales ofrecían dudas. ¿Eso era de veras una sonrisa? ¿Cuentan las sonrisitas de suficiencia? ¿Y si enseñan los dientes, pero no parecen contentos?».

Los sistemas de reconocimiento facial, la mayoría de los cuales se basan en el aprendizaje profundo, han recibido fuertes críticas por sus sesgos. En el Media Lab del MIT se ha descubierto que la precisión disminuye a la hora de distinguir los rostros que no pertenecen a hombres blancos. Por lo general, tales errores derivan del empleo de conjuntos de entrenamiento en los que abundan los rostros blancos y masculinos. La identificación de las emociones ha de lidiar con entornos complejos: las expresiones son dinámicas y presentan sutiles diferencias dependiendo de si se trata de fotos posadas o espontáneas.

Rhue, investigadora de la Universidad de Maryland, utilizó un conjunto de imágenes públicas de jugadores profesionales de baloncesto para probar dos servicios de reconocimiento de emociones, uno de Microsoft y otro de Face++, una empresa de reconocimiento facial con sede en China. De forma sistemática, ambos atribuyeron más emociones negativas a los jugadores negros que a los blancos, aunque cada uno en aspectos distintos: Face++ veía enfadados al doble de jugadores negros que de blancos; por su parte, cuando la expresión era ambigua, Microsoft percibía desprecio en los jugadores negros tres veces más que en los blancos. La investigadora sugiere que el problema deriva probablemente de un sesgo en las imágenes etiquetadas de los conjuntos de entrenamiento. Ni Microsoft ni Face++ han respondido a las peticiones de comentarios.

Muchas empresas reiteran que son conscientes del problema y que ya lo están abordando. El algoritmo de Retorio se ha entrenado con un conjunto de datos, recopilados a lo largo de varios años con voluntarios remunerados, que consta de entrevistas grabadas en vídeo y etiquetadas con rasgos de personalidad, explica el cofundador de la empresa, Christoph Hohenberger. Afirma que se han tomado medidas para eliminar diversos sesgos sociodemográficos y culturales que en las evaluaciones de la personalidad favorecerían a un grupo en detrimento de otro. Sin embargo, dado que por ahora no existe ningún tipo de regulación ni de supervisión del sector, no queda más remedio que aceptar la palabra de las empresas, pues la robustez y la equidad de los conjuntos privados de datos son difíciles de verificar. HireVue, otra compañía que lleva a cabo videoentrevistas y analiza mediante algoritmos el lenguaje y el tono de voz de los candidatos, contrató a un auditor externo para que buscara sesgos, pero se trata de una excepción.

«La idea de que existe un mismo patrón para todos los seres humanos y que todos pueden cumplirlo por igual» falla por su base, apunta Ifeoma Ajunwa, profesora de la Facultad de Derecho de la Universidad de Carolina del Norte, que estudia la toma de decisiones basada en la inteligencia artificial. Este planteamiento implica que «aquellos que no se adecúen a él se hallarán en desventaja», añade.

APARTE DE LA PREOCUPACIÓN por los sesgos, el concepto de que las apariencias externas corresponden a una emoción interna descifrable por cualquier persona ha empezado a generar una fuerte oposición científica. Ello supone un cambio con respecto a medio siglo atrás, cuando se propuso esta idea. Por entonces, Ekman y Friesen llevaban a cabo un trabajo de campo con los fore, una tribu de las tierras altas del sureste de Papúa Nueva Guinea, con el fin de comprobar si reconocían y entendían las expresiones faciales del mismo modo que otros individuos de orígenes radicalmente distintos, como un estibador de Brooklyn o una enfermera de Senegal. A los voluntarios se les mostraban retratos que exhibían expresiones de las denominadas seis emociones básicas. Un traductor les facilitaba descripciones sucintas para situarlas en contexto: «Está miran-





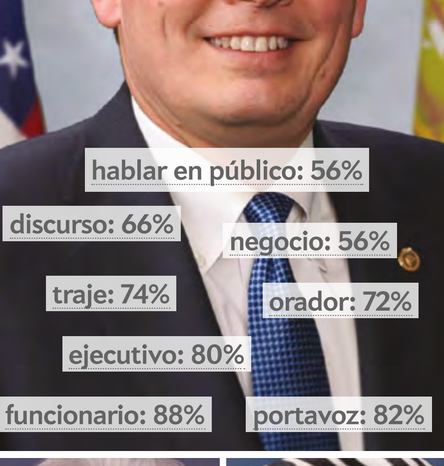


SESGO POR SEXO: En un estudio con rostros de políticos, el programa de IA emocional Google Cloud Vision determinó que pocos hombres sonreían. Sin embargo, la revisión de las imágenes por los investigadores se saldó con que la gran mayoría exhibía una sonrisa. Por el contrario, el programa aplicaba la etiqueta de «sonrisa» a muchas mujeres. Los porcentajes junto a los atributos mostrados en dos de las imágenes representan el grado de confianza de la IA en la exactitud de la respuesta. A la mujer le asignó la etiqueta «sonrisa» con un 64 por ciento de confianza, además de otras centradas en su cabello, mientras que en el caso del hombre dicha etiqueta brillaba por su ausencia.



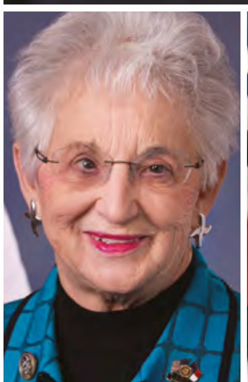












«DIAGNOSING GENDER BIAS IN IMAGE RECOGNITION SYSTEMS», CARSTEN SCHWEMMER ET AL. EN *SOCIUS: SOCIOLOGICAL RESEARCH FOR A DYNAMIC WORLD*, VOL. 6, PUBLICADO EN LÍNEA EL 11 DE NOVIEMBRE DE 2020 (*retratos con etiquetas*); WIKIPEDIA (*retratos*).

do algo que huele mal» para el asco, por ejemplo. Las respuestas de los fore coincidían en gran medida con las de los encuestados en países como Japón, Brasil o Estados Unidos, de manera que los investigadores concluyeron que las expresiones faciales constituían un lenguaje emocional inteligible universalmente.

La noción de que un conjunto común de expresiones representaban los estados emocionales básicos ganó con rapidez una amplia aceptación en campos como la psicología. Ekman y Friesen elaboraron un atlas que permitía interpretarlas, el Sistema de Codificación de la Acción Facial (FACS, por sus siglas en inglés), integrado por miles de movimientos faciales. Tanto el atlas como la teoría se convirtieron en piedras angulares de la IA emocional y han servido de base a numerosas aplicaciones, como las desarrolladas por la empresa Affectiva, que abarcan sistemas destinados a la automoción y los estudios de mercado.

Sin embargo, se ha argumentado que las teorías de Ekman presentan lagunas. En un artículo publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* en 2012 se ofrecían datos que revelaban que las expresiones faciales variaban de manera considerable según las culturas. Y en 2019, Lisa Feldman Barrett, psicóloga de la Universidad de Northeastern, publicó junto con varios colegas un estudio en el que se examinaban más de mil artículos científicos sobre las expresiones faciales. Hallaron que la noción de que el rostro revela signos externos de las emociones más comunes se había extendido a campos que van desde la tecnología hasta el derecho, pero con pocas pruebas sólidas que la sustenten.

Las emociones básicas constituyen categorías estereotipadas generales, indica Barrett. En cada momento, las expresiones faciales reflejan complejos estados internos: una sonrisa puede ocultar dolor o transmitir compasión. La psicóloga sostiene que, hoy en día, es casi imposible que un sistema de IA clasifique de forma fiable e invariable esos estados internos si ha sido entrenado con datos que son, en esencia, colecciones de estereotipos etiquetados. «Se trata de medir algo y luego inferir su significado desde el punto de vista psicológico», explica. «Son cosas distintas. No puedo asegurarlo a ciencia cierta de todas las empresas, obviamente, pues no conozco todo lo que se está haciendo, pero la tecnología de reconocimiento de emociones que se anuncia confunde continuamente ambos aspectos.»

Según Crawford, una de las razones del problema estriba en que el mundo de las tecnológicas emergentes no está al tanto de los debates científicos en otras disciplinas y se siente cautivado por la elegante simplicidad de sistemas como el FACS. «¿Por qué el campo del aprendizaje automático se ha visto atraído por las teorías de Ekman?», se pregunta retóricamente. «Porque encaja muy bien con la capacidad de aprendizaje de las máquinas. Si alguien dice que existe un conjunto limitado de expresiones y un número muy limitado de emociones posibles, la gente optará por esa visión básicamente porque es una teoría que se ajusta a lo que las herramientas pueden lograr», responde. Además de los trabajos de Ekman y del modelo OCEAN de los rasgos de la personalidad, las empresas de IA emocional han adoptado otros sistemas. Uno de ellos es la «rueda de las emociones», concebida por el difunto psicólogo Robert Plutchik, con el que la empresa británica Adoreboard analiza las emociones en textos. Todos estos enfoques ofrecen traducir la complejidad de los sentimientos humanos en fórmulas inequívocas y pueden adolecer también de fallos similares; en otro estudio de 2019, se constató que OCEAN producía resultados contradictorios en culturas diferentes.

> «Existe una marcada discrepancia entre lo que estas cosas nos muestran y lo que quizás esté pensando o sintiendo una persona»
>
> **Kate Crawford, Universidad del Sur de California**

Aun así, los partidarios aseguran que las apli-

caciones emocionales pueden funcionar siempre y cuando se comprendan sus limitaciones. La especialista en robótica Ayanna Howard, decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Estatal de Ohio, emplea robots equipados con una versión modificada del programa de reconocimiento de expresiones faciales de Microsoft para enseñar conductas sociales a niños con autismo. Si un robot detecta «enfado» en su interlocutor, por ejemplo, sus movimientos se adaptarán para calmar la situación. Las expresiones faciales estereotipadas no siempre significan exactamente lo mismo, admite Howard, pero resultan útiles. «Sí, cada uno de nosotros es único, pero no somos tan diferentes de nuestro vecino. Y por eso, cuando se habla de emociones en general, quizá no se acierte siempre, pero sí más veces que al azar», concluye.

En general, los algoritmos que examinan y agrupan las reacciones de un gran número de personas, como los que utiliza Zenus para leer los sentimientos de los asistentes a un evento, serán más precisos, afirma Barrett, pues «mejor que por azar» adquiere sentido estadístico con poblaciones grandes. Sin embargo, la evaluación de individuos resulta traicionera, ya que cualquier cosa que no sea una exactitud del cien por cien acabará discriminando a ciertas personas.

Numerosos especialistas en visión artificial adoptan ahora una perspectiva agnóstica con respecto a las expresiones faciales. (Y cada vez más empresas manifiestan que no correlacionan directamente las emociones o los estados internos.) «El desarrollo del campo ha traído consigo una conciencia cada vez mayor de que muchos gestos no tienen nada que ver con los sentimientos», apunta Jonathan Gratch, profesor de ciencias de la computación en la Universidad del Sur de California y especialista en informática afectiva. «Son instrumentos que usamos para influir en los demás, casi como si fueran palabras de una conversación, por lo que tienen un significado. Pero no brindan un acceso directo a lo que uno siente en un determinado momento.»

A MEDIDA QUE AUMENTAN los intentos de correlacionar y monetizar las expresiones emocionales, los rasgos de la personalidad y las conductas, también se amplían los ámbitos de nuestra vida sometidos a vigilancia. Las compañías tecnológicas han dedicado veinte años a extraer datos personales de nuestros hábitos digitales y ahora un área de interés más íntima como es el rostro y el cuerpo, junto con las señales que envían, empieza a recibir un tratamiento similar. «Si diriges una campaña de Coca Cola y tu principal canal de comunicación es Internet, lo sabrás todo acerca de la audiencia a la que llegas», comenta Jay Hutton, director ejecutivo de VSBLTY, una empresa de Vancouver que comercializa cámaras inteligentes y programas destinados a tiendas minoristas que analiza los datos sociodemográficos de los clientes y sus reacciones ante los productos. «¿Y si con la visión artificial pudiéramos alcanzar esa misma profundidad de análisis en las compras presenciales?».

En diciembre de 2020, VSBLTY anunció un acuerdo con la cervecera mexicana Grupo Modelo para instalar antes de 2027 una red de cámaras que recogería datos en las 50.000 bodegas y tiendas Modelorama que esta tiene en México y otros países latinoamericanos. Existirá demanda allí donde haya pantallas y publicidad, señala Hutton. La tecnología «se usará en intercambiadores de transporte, o en aeropuertos, o en estadios deportivos», añade. «Los anunciantes invierten millones de dólares en patrocinio, sus anuncios aparecen en las pantallas repartidas por todo el estadio, y buscan una validación de esa estrategia.»

Esta tendencia plantea una cuestión jurídica y social básica: ¿los datos de la cara y del cuerpo pertenecen al individuo? En la mayoría de los países la respuesta es no, siempre y cuando esos datos se mantengan disociados de la identidad personal. «Si una persona se encuentra en un lugar público, parece que no haya restricciones para escanearla con el fin de conocer sus emociones», confirma Jennifer Bard, profesora de la Facultad de Derecho de la Universidad de Cincinnati, que ha estudiado el asunto.

La mayoría de las empresas de IA emocional que recopilan datos en espacios públicos declaran que la información es anónima y que, por tanto, su obtención no debería ser causa de preocupación. VSBLTY no almacena imágenes faciales ni otros datos que puedan vincularse a la identidad, afirma Hutton. Moutafis, de Zenus, asegura que la aplicación de su empresa no sube las imágenes reales de

los rostros que captan sus cámaras, solo los metadatos relevantes sobre el estado de ánimo y la posición, y que en las pantallas instaladas en los recintos se informa de que el evento está siendo monitorizado. «No es necesario un consentimiento explícito», añade. «A quienes instalan nuestro sistema siempre les decimos que es una buena práctica; cuando se tiene cierta sensibilidad hacia la vigilancia, lo correcto es informar de que esa zona se está monitorizando. Según él, la gente no suele darle importancia y se olvida de las cámaras. Sin embargo, la diversidad de aplicaciones se traduce en la ausencia de reglas comunes. Además, no parece nada claro que la sociedad acoja con los brazos abiertos esta vigilancia asidua una vez que su regulación se convierta en una cuestión política.

Ekman, que en el pasado trabajó en IA emocional con la empresa Emotient y con Apple, advierte ahora de la amenaza que supone para la intimidad y sostiene que se debería obligar legalmente a las empresas a obtener el consentimiento de cada persona que escanean. «Por desgracia, se trata de una tecnología que puede usarse sin que uno se entere. De hecho ya está empleándose, y no precisamente en aras de la felicidad, sino para que compremos productos que de otro modo no adquiriríamos. Y ese es posible que sea el más benigno de sus usos no benignos», añade.

La IA emocional también ha invadido el espacio personal, donde el surtido de datos conductuales es aún más rico. Alexa, de Amazon, analiza la entonación del usuario en busca de signos de frustración para mejorar sus algoritmos, según un portavoz. En el año 2023, algunos fabricantes de automóviles estrenarán sistemas de cabina con IA integradas que generarán enormes cantidades de datos sobre el comportamiento del conductor y de los pasajeros. Esta información, que probablemente también será anónima, se destinará a perfeccionar las respuestas del sistema y el diseño interior del vehículo, y servirá para medir el comportamiento agregado, como el rendimiento del conductor. (Tesla ya recoge datos de múltiples fuentes en sus vehículos.) Según Modar Alaoui, director ejecutivo de la empresa de IA emocional Eyeris, cabe la posibilidad de que los clientes dispongan de opciones para activar diversos niveles de estos sistemas, de modo que si los ocupantes no usan ciertas funciones, no se recopilará información. Los sistemas de cabina diseñados por Affectiva (recientemente adquirida por la sueca Smart Eye) no graban vídeos, pero los metadatos estarían disponibles, asegura la directora de *marketing* Gabi Zijderveld.

ALEIX MARTÍNEZ, experto en visión artificial de la Universidad Estatal de Ohio y Amazon, y coautor junto con Barrett del artículo de 2019 que critica la conexión entre el rostro y las emociones, guarda una foto que le gusta enseñar a la gente. En ella se observa la cara de un hombre que parece crispado por una mezcla de ira y miedo. A continuación muestra la imagen completa: es un futbolista exultante tras marcar un gol. Las expresiones faciales, los gestos y otras señales no son solo fruto del cuerpo y el cerebro, explica, sino también del contexto, de lo que sucede en torno a la persona. De momento, ese ha constituido el mayor reto para la IA emocional: interpretar un contexto ambiguo. «A menos que sepa qué es el fútbol, nunca seré capaz de entender lo que ocurrió allí. Así que ese conocimiento resulta fundamental, pero hoy por hoy no existe ningún sistema de IA capaz de hacerlo bien», dice Martínez.

La tecnología se vuelve más eficaz, prosigue, si la tarea es específica; el entorno, sencillo, y la información biométrica recopilada, diversa: voz, gestos, pulso, flujo sanguíneo bajo la piel, etc. Las próximas generaciones de IA emocional podrían combinar exactamente este tipo de información. Pero ello, a su vez, solo dará lugar a tecnologías más potentes e intrusivas para las cuales la sociedad quizá no esté preparada.

John McQuaid, periodista y escritor, redactó este artículo mientras era miembro del Centro Internacional para Académicos Woodrow Wilson, en Washington D.C. En la actualidad es doctorando en la Facultad de Periodismo Philip Merrill, de la Universidad de Maryland.



EN NUESTRO ARCHIVO

El traje nuevo de la inteligencia artificial. Ramón López de Mántaras en *IyC*, julio de 2020.
Los sesgos de los algoritmos. Ricardo Baeza-Yates en *IyC*, octubre de 2021.
Es hora de exigir explicaciones a la inteligencia artificial. Sara Lumbreras en *IyC*, noviembre de 2021.



BIOLOGÍA CELULAR

EL LENGUAJE MOLECULAR DE LAS CÉLULAS

Philip Ball | Los sistemas de señalización molecular que rigen el funcionamiento de las células eucariotas son extraordinariamente enrevesados. Pero su aparente caos les ofrece claras ventajas

Allá por el año 2000, Michael Elowitz, del Instituto de Tecnología de California (Caltech), cuando no era más que un estudiante de grado en la Universidad de Princeton, consiguió una proeza notable en el joven campo de la biología sintética: fue uno de los pioneros en el diseño de una especie de «circuito electrónico» en las células vivas y en demostrar que funcionaba. Junto a su mentor, Stanislas Leibler, introdujo en la bacteria *Escherichia coli* un juego de genes que inducía la síntesis oscilatoria de una proteína fluorescente intracelular, igual que haría un oscilador en un circuito electrónico.

Esto sirvió para ilustrar con brillantez lo que el biólogo y premio nóbel François Jacob había denominado la «lógica de la vida»: un flujo de información estrechamente controlado desde los genes hasta los rasgos exhibidos por las células y otros organismos.

Pero esta lúcida intuición, que funcionaba con tanta elegancia en las bacterias, suele fracasar con las células más complejas. Según Angela DePace, bióloga de sistemas de la Escuela de Medicina de Harvard, «en las bacterias, cada cosa está regulada por una única proteína, mientras que en los organismos más complejos están involucradas varias proteínas de manera más analógica».

Recientemente, al observar con detalle las interacciones proteicas en una vía clave del desarrollo de la forma de los embriones humanos y de otros animales complejos, Elowitz y sus colaboradores han vislumbrado la verdadera realidad de la lógica de la vida compleja. Esta vía es un revoltijo de promiscuidad molecular que haría sonrojar al más libertino: las moléculas que participan se juntan en muchas combinaciones diferentes. Parece imposible que de este baile caótico surja alguna señal razonable capaz de orientar el destino de una célula. Por si fuera poco, esta especie de acoplamiento sin orden ni concierto entre las biomoléculas resulta ser la norma, no una rara excepción. De hecho, podría ser la razón que habría conseguido que funcione la vida pluricelular.

Para Elowitz, «el revoltijo caótico de los circuitos biológicos de comunicación intercelular, con sus familias de ligandos y receptores en promiscua interacción, descansa en una arquitectura diametralmente opuesta a la que habría diseñado un biólogo sintético».

No obstante, este aparente caos de componentes interaccionantes es, en realidad, un sofisticado sistema de procesamiento de señales capaz de extraer con eficacia información fiable a partir de cócteles complicados de moléculas de señalización. Elowitz apostilla que «conocer el lenguaje combinatorio natural de las células nos permitiría controlar[las] de manera mucho más específica de lo que hacemos hoy día».

Este nuevo panorama hace mucho más que reconfigurar nuestra visión de lo que son capaces de hacer las biomoléculas celulares a medida que se va construyendo un organismo, esto es, cuál es la lógica que siguen para crear una vida compleja. También podría ayudarnos a conocer la razón por la que los seres vivos logran sobrevivir en un medio imprevisto, y por qué la aleatoriedad les permite evolucionar en lugar de impedirlo. También podría explicarnos los reveses de la medicina molecular: por qué muchos candidatos a fármaco no hacen lo que se espera de ellos y cómo podríamos fabricar unos que sí lo hagan.

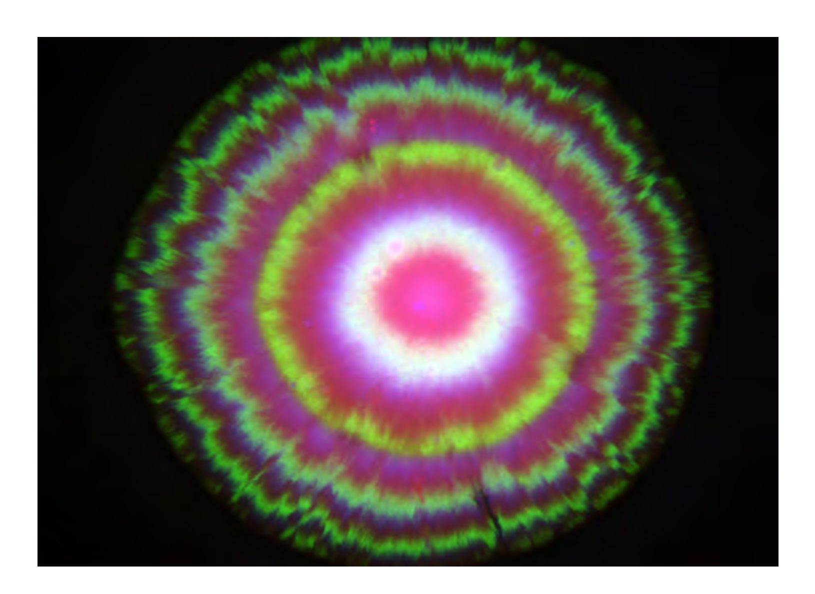
PÁGINA ANTERIOR: OLENA SHMAHALO/QUANTA MAGAZINE

EN SÍNTESIS

En las células eucariotas complejas, las moléculas se juntan e interaccionan en una enorme variedad de combinaciones cuya lógica intentan desentrañar los biólogos.

El aparente caos de las interacciones moleculares constituye en realidad un refinado sistema de procesamiento de señales del que se extrae información fiable para el funcionamiento de la célula.

Conocer el lenguaje combinatorio natural de las células nos permitiría controlarlas de manera mucho más específica de lo que hacemos hoy día.



LAS BACTERIAS de esta colonia de *Escherichia coli* sintetizan proteínas fluorescentes en distintas concentraciones (*anillos*) bajo el control de un circuito genético que se ha insertado a propósito. Esta clase de control genético es mucho más difícil de montar en células tan complejas como las eucariotas, ya que su señalización molecular se ha mostrado más elaborada.

FUENTE: «SYNCHRONOUS LONG-TERM OSCILLATIONS IN A SYNTHETIC GENE CIRCUIT», LAURENT POTVIN-TROTTIER ET AL. EN *NATURE*, VOL. 538, PÁGS. 514-517, OCTUBRE DE 2016.

Mensajeros, no los mensajes

Si estuviéramos diseñando una máquina o un circuito electrónico, sería disparatado inspirarse en las células. La gran mayoría de los componentes celulares no se disponen ni ensamblan con cuidado, sino que se dedican simplemente a flotar y mezclarse dentro de una membrana, a empujones, como una muchedumbre indisciplinada. Lo sorprendente es que funcione.

La explicación tradicional y bonita es que, aunque las moléculas proteicas que constituyen la mayoría de las partes funcionales de una célula choquen constantemente unas con otras, los encontronazos suelen percibirse con indiferencia. Solo se unen e interaccionan entre sí cuando una proteína se topa con otra con la que se encaja a la perfección gracias a que una parte de su superficie está esculpida al más mínimo detalle. La precisión del reconocimiento molecular mantiene despejadas las líneas de comunicación intracelular y garantiza su funcionamiento.

El único problema de esta historia es que anda desencaminada. Aunque muchas proteínas manifiesten un reconocimiento molecular selectivo, las más importantes para el funcionamiento de las células eucariotas suelen ser mucho menos quisquillosas.

Tomemos las proteínas del factor de crecimiento denominado BMP, que regulan la proliferación celular y su diferenciación en diversos tejidos al hacerlas encender y apagar un conjunto de genes. Su sigla en inglés, BMP, viene de «proteína morfogénica de los huesos» porque el primer gen que se les conoció se pensó en un principio que codificaba una proteína de la formación de los huesos.

Aunque participan realmente en ello (un fallo en la producción de las BMP provoca enfermedades relacionadas con el crecimiento óseo), la idea de que el crecimiento de los huesos dependa de estas proteínas hace tiempo que se descartó. Un tipo de BMP interviene en la etapa del desarrollo denominada gastrulación, que tiene lugar en torno a los 14 días después de la fecundación en los embriones humanos, cuando las células comienzan a especializarse en diferentes tipos de tejidos y el embrión deja de ser un agregado de células para convertirse en una estructura mucho más compleja. Más tarde, las BMP también se expresan en el cartílago, los riñones, los ojos y el primordio del cerebro, y guían el desarrollo de estos tejidos.

Lo cierto es que la función de las BMP no puede definirse por su efecto sobre el fenotipo (es decir, sobre los rasgos). Intervienen en la comunicación entre las células, pero lo que se desencadena puede variar totalmente de un tipo celular a otro o, dentro de un mismo tipo, de una etapa del desarrollo a otra. Las BMP son las mensajeras, no los mensajes.

Lo que Elowitz y otros están ahora haciendo público es cómo las BMP sacan adelante el truco de ser tan volubles y a la vez comportarse de manera tan predecible, hasta conseguir que los organismos les confíen su vida. Estas cualidades parecen emerger de las capas y capas de complejidad de la composición del

sistema de las BMP, y de la afinidad variable y flexible de unos elementos por otros. Paradójicamente, la complejidad hace que el sistema sea más preciso y fiable.

Los mamíferos tienen genes que codifican al menos 11 proteínas de tipo BMP, cada una con una estructura ligeramente distinta. Actúan en parejas (dímeros) formados por la misma o diferentes BMP, y, en algunos casos, los dímeros también se emparejan entre sí, con lo que se multiplican aún más las variaciones. Las diferentes BMP se pegan a una familia concreta de proteínas receptoras, que están formadas a su vez por subunidades que se encajan en pequeños grupos (lo típico es que se encajen cuatro subunidades). Este conglomerado de moléculas hace que los factores de transcripción activen y desactiven genes, y desencadenen un efecto en cascada en la célula hospedadora.

Sin embargo, cada dímero de BMP no se diseñó para encajar a la perfección con un único receptor, como lo hace una llave con una cerradura. De hecho, estas moléculas no son muy melindrosas porque cada dímero de BMP puede pegarse a diferentes parejas de subunidades receptoras con distintos grados de avidez. Se trata de un sistema combinatorio en el que los componentes se ensamblan de muchas maneras: no tanto como llaves y cerraduras, sino más bien como bloques de Lego.

Resulta agotador pensar en las posibles permutaciones. ¿Cómo puede la vía de las BMP emitir una directriz específica que oriente el destino de una célula? Con tantísima complejidad, «hay que abordar el problema de un modo poco convencional», comenta James Linton, investigador del grupo de Elowitz.

El equipo de Caltech, en colaboración con Yaron Antebi (en su día posdoc de Elowitz y ahora investigador del Instituto Weizmann de Ciencias, en Israel), emprendió unos estudios experimentales y computacionales para caracterizar en dos tipos de células de ratón la propensión a fijarse que tienen las diez formas principales de las BMP de los mamíferos y las siete subunidades receptoras. Esto obligó a estudiar muchas combinaciones, lo que se pudo abordar gracias a un sistema robótico que llevaba a cabo automáticamente las reacciones en los cultivos celulares.

Las interacciones, aunque promiscuas, estaban lejos del «todo vale». Algunas BMP tenían efectos casi intercambiables, mientras que otras no. En algunos casos, una BMP con sus dos subunidades receptoras funcionaba igual que otro ensamblaje de componentes diferentes. Un conjunto podría seguir funcionando igual cuando la BMP se permutaba por otra, pero solo si no se cambiaba el receptor. Unas veces, los dos componente intercambiados tenían efectos independientes y su efecto combinado era una simple suma. En otras, los efectos se reforzaban mutuamente o se cancelaban entre sí.

En líneas generales, las BMP se clasificaron en grupos de equivalencia. «Consideramos que dos BMP son equivalentes si tienen el mismo perfil de interacción con las demás BMP», explica Elowitz. Pero esas relaciones de equivalencia no eran fijas, ya que variaban con el tipo celular y la configuración de los receptores que se expresaban en las células. Una pareja de BMP podría intercambiarse en un tipo celular, pero no en otro. Este hallazgo coincidía con las observaciones de otros investigadores en las que, por ejemplo, la BMP9 podía sustituir a la BMP10 en la vía de formación de los vasos sanguíneos, pero no en la vía de desarrollo del corazón.

Más especificidad con menos señales

¿Por qué la señalización de las BMP parece funcionar de un modo tan innecesariamente complicado? El equipo de Caltech supone que a los organismos podría aportarles mucho con muy poco. La modelización matemática acometida por los miembros del equipo (Christina Su en Caltech, Antebi en Israel y Arvind Murugan en la Universidad de Chicago) mostró que la promiscuidad en un sistema de interacciones abre un gran abanico de ventajas frente a las interacciones moleculares específicas.

En concreto, en los sistemas en los que cada ligando se fija únicamente a su receptor, el número de tipos de ligandos limita la cantidad de tipos celulares o dianas diferentes sobre los que actuar selectivamente. En un sistema combinatorio, los distintos emparejamientos entre un número pequeño de ligandos y receptores consiguen especificar una cantidad mucho mayor de dianas. Las diferencias entre las parejas también permiten graduar los efectos en vez de dar una respuesta de «todo o nada».

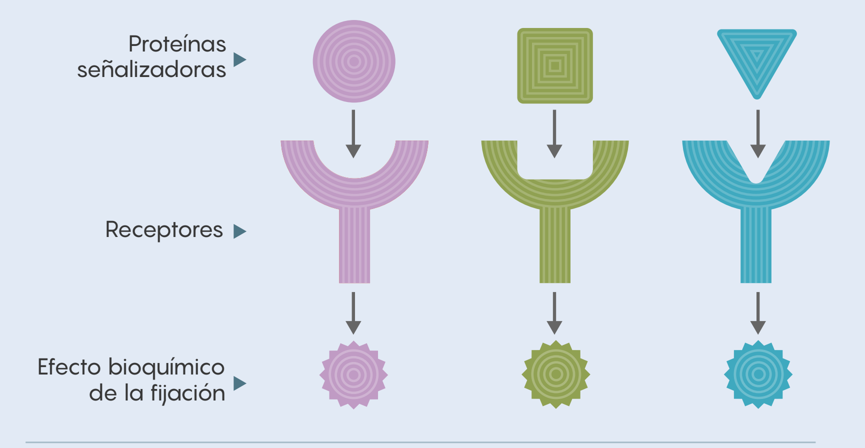
Elowitz nos explica que «la hipótesis de trabajo es que estas combinaciones de ligandos y receptores podrían ser más específicas del tipo celular que las moléculas por separado».

La nueva lógica de la vida

Los biólogos suponen a menudo que los sistemas de señalización celular dependen de interacciones muy específicas entre las proteínas y los receptores. Pero la realidad es que estas moléculas suelen fijarse de manera promiscua, lo que produce efectos diferentes en función de las combinaciones y del contexto.

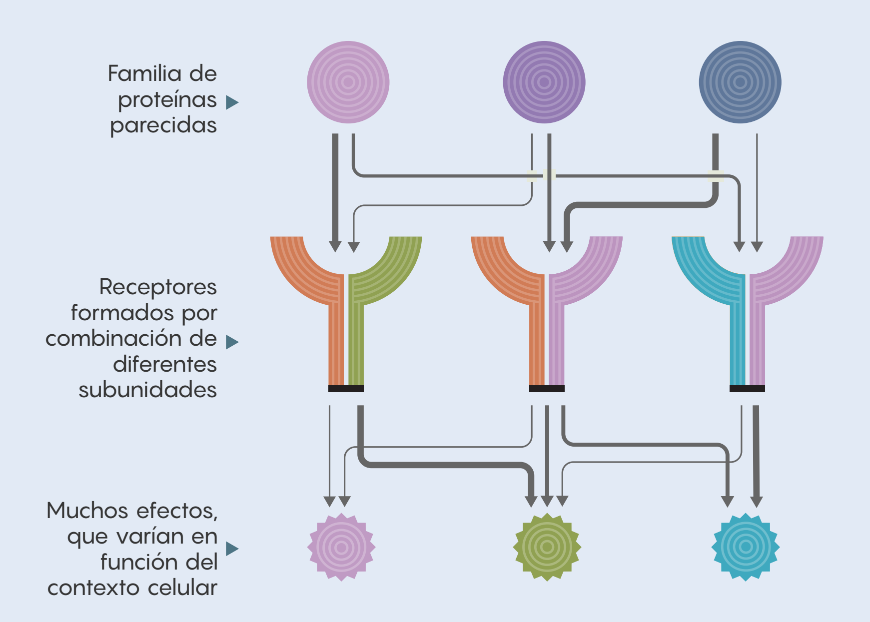
ANTIGUO MODELO DE LLAVE Y CERRADURA

Las proteínas señalizadoras se fijan a receptores muy específicos y desencadenan efectos muy concretos.



NUEVO MODELO COMBINATORIO Y PROMISCUO

Las proteínas de estructura parecida se fijarían al mismo receptor con distinta fuerza. El receptor también estará formado por diferentes combinaciones de subunidades. El sistema consigue modular con facilidad muchos efectos concretos en las células.



SAMUEL VELASCO/*QUANTA MAGAZINE*; FUENTE: MICHAEL ELOWITZ Y YARON ANTEBI.

Por lo tanto, un sistema combinatorio ofrece más opciones para actuar sobre las células y promueve una diferenciación celular más compleja. Dicha versatilidad resulta decisiva para construir organismos con muchos tipos celulares en configuraciones precisas. Así pues, con un repertorio pequeño de moléculas señalizadoras se conseguirá instruir a un grupo de células del embrión para que se conviertan en un cartílago, mientras que otro grupo sabrá que ha de convertirse en hueso, y que otras células tengan otros destinos.

> «Nuestra hipótesis de trabajo es que estas combinaciones de ligandos y receptores podrían ser más específicas del tipo celular que cada una de las moléculas»
>
> **Michael Elowitz,**
> **Instituto de Tecnología de California**

La gran cantidad de combinaciones posibles podría generar cierta imprecisión en las fronteras entre las regiones, pero Linton supone que se definirían con nitidez en colaboración con otros sistemas de señalización. Por ejemplo, una vía en la que participa la familia de proteínas Wnt a menudo aparece junto a la señalización de las BMP. Para Linton, «si se detecta una BMP en alguna parte, es muy probable que también esté una Wnt». Unas veces, las vías son mutuamente antagónicas, mientras que en otras ocasiones se refuerzan. Si la vía de Wnt siguiera las mismas reglas combinatorias (una posibilidad que todavía necesita confirmación experimental, recalca Elowitz), entonces BMP y Wnt podrían refinarse mutuamente la señalización de cada una.

Elowitz y sus colaboradores piensan que, de este modo, esta clase de reglas combinatorias podría representar un «principio de diseño» muy extendido para la conexión molecular entre las células.

La bióloga de sistemas Galit Lahav, de la Escuela de Medicina de Harvard, coincide con que esta organización tiene mucho sentido. Se pregunta si algo similar podría aplicarse al gen *p53*, que es capital para controlar el ciclo celular en función de la replicación y de la división, y que a menudo interviene en el cáncer. La proteína p53 desempeña diversas funciones en la señalización celular y se fija a muchas otras moléculas.

El principio combinatorio también podría extenderse a otras situaciones, más allá del crecimiento y desarrollo celulares. Linton ve cierto paralelismo con lo que parece ocurrir con el olfato: los humanos tenemos unos 400 tipos de proteínas receptoras que revisten las membranas del bulbo olfativo de la nariz, y entre todos los receptores consiguen discriminar un número inmenso de olores. Eso no sería posible si cada molécula de olor tuviera que ser reconocida únicamente por su propio receptor específico. En cambio, los receptores parecen fijarse de manera promiscua a los olores con diferente afinidad, de manera que la señal resultante que se envía al centro olfativo del cerebro viene determinada por las reglas combinatorias.

Sacar provecho del ruido

Los resultados que apoyan la flexibilidad y promiscuidad de las interacciones de las proteínas, de las moléculas de ARN y de las secuencias genómicas del ADN implicadas en la regulación celular han empezado a abundar en los últimos diez años, más o menos. Cubren un amplio abanico de sistemas por toda la biología. «Dado que la promiscuidad no debería existir, pero es ubicua, la suposición más sencilla y razonable es que aporta ciertas competencias funcionales», propone Elowitz, que está convencido de que estas competencias tienen su origen en el procesamiento de la información: «Al igual que las neuronas conectadas a través de axones y dendritas procesan la información compleja, las proteínas también se conectan mediante interacciones bioquímicas». Otros científicos también han llegado a la misma conclusión a partir de los estudios sobre redes bioquímicas.

Heidi Klumpe, la investigadora del grupo de Elowitz que realizó gran parte del trabajo experimental sobre el sistema de las BMP, lo compara con la manera en que funcionan las redes neuronales: no se asigna una función fija a cada componente de la red, sino que se deja que surja de las muchas conexiones. Klumpe piensa que «la computación celular es mucho más compleja de lo que imaginábamos».

«Lo que intentamos hacer ahora es averiguar con precisión qué clase de funciones computan realmente estos sistemas y qué capacidades de alto nivel proporcionan dichas computaciones», añade Elowitz.

Las redes de proteínas muy interconectadas podrían favorecer en los organismos la capacidad de adquirir nuevas facultades a lo largo de la evolución

El biólogo evolutivo Andreas Wagner de la Universidad de Zúrich considera que «estamos dando en el clavo» con la idea de que los sistemas promiscuos se seleccionan porque confieren ventajas. Que el beneficio provenga de su versatilidad representa para él «una posibilidad fascinante que probablemente se le habrá pasado por la cabeza a cualquiera que medite en serio sobre este problema».

Pero Wagner añade que «hay otra posibilidad más prosaica»: quizás sea el único modo en el que pueda funcionar un sistema complicado como las células de los organismos pluricelulares. «Los sistemas celulares son muy ruidosos», explica; los atropellados encontronazos moleculares en el atestado entorno intracelular resultan impredecibles, y la cantidad de proteínas que se sintetizan en distintos momentos fluctúa de manera aleatoria. Una célula en la que cada componente está conectado con otro de manera específica podría ser muy vulnerable a las variaciones incontrolables. Se comportaría como si los elementos de un circuito se dejaran caer al azar dentro y fuera de la red.

Además, cada vez que se divide una célula no hay ninguna garantía de que el circuito se reproduzca exactamente igual debido a que la replicación del ADN introduce errores aleatorios durante la copia. Wagner advierte que «un sistema así podría ser muy sensible a las mutaciones que alteren sus propiedades. En conjunto, todos estos costes podrían volverse prohibitivos».

La consecuencia lógica es que las células acabaron desarrollado adaptaciones que sacaron provecho del ruido, y el modelo de Elowitz sobre la lógica combinatoria de las redes reguladoras «puede ser un ejemplo de tal adaptación», puntualiza Wagner. «Las células pueden tener sistemas chapuceros cuyo poder emerge de las combinaciones correctas.»

Para Meng Zhu, bióloga del desarrollo de la Escuela de Medicina de Harvard, «los sistemas biológicos son por lo general mucho más robustos de lo que imaginábamos». Cuando se inactiva de forma experimental un gen decisivo para la supervivencia, no suele observarse ninguna alteración en el organismo porque seguramente se reajustan las interacciones y las redes de genes y proteínas para compensarlo. Defiende que la redundancia y la función compensatoria de las proteínas relacionadas, como se observa en el sistema de las BMP, podrían resultar esenciales para dicha capacidad.

Zhu piensa que estas redes de proteínas promiscuas muy interconectadas también podrían favorecer la capacidad que tienen los organismos para adquirir nuevas facultades útiles a lo largo de la evolución. En sus propias palabras, «un sistema que tenga mayor conectividad tenderá a desarrollar nuevas funciones con mayor facilidad» porque tolerará mejor las mutaciones perjudiciales en los elementos que lo componen.

Y a la inversa, si todas las interacciones entre los componentes moleculares estuvieran sintonizadas con enorme precisión, «resultaría muy difícil hacer algo nuevo», nos asegura

Ard Louis, físico de la Universidad de Oxford dedicado a los problemas de la complejidad biológica. Cualquier cambio en estos componentes, incluso uno que parezca ventajoso, seguro que alterará alguna función existente, posiblemente vital.

La promiscuidad de las fijaciones que posibilitan que una proteína sustituya a otra podría permitir, por lo tanto, que la red adquiera nuevas funciones sin perder las antiguas. Wagner, en colaboración con Joshua Payne, de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, ha encontrado el respaldo para esta idea: la fijación promiscua de los factores de transcripción favorece tanto la robustez ante las mutaciones como la capacidad para desarrollar nuevas funciones.

Así pues, podría ocurrir que un sistema combinatorio de fijación de ligandos genere más opciones para las células y dé a los organismos más capacidad de evolución y robustez contra el ruido. La evolución puede haber organizado gran parte de la bioquímica celular para que sea mucho menos sensible a los detalles de lo que se piensa.

Klumpe está convencido de que «los sistemas biológicos ruidosos que se han desarrollado están llenos de detalles, pero muchos de ellos son irrelevantes. Además, puede que lo importante no sea un detalle concreto, sino más bien la conservación de cierto funcionamiento de alto nivel», como que sea necesario que los factores de transcripción se fijen con una determinada fuerza para encender la expresión génica.

Un circuito es demasiado simple

Esta clase de «chapuzas» en las redes biomoleculares puede tener consecuencias importantes para el desarrollo de los fármacos. Según Elowitz, «uno de los retos de la medicina cotidiana es que los fármacos son muy específicos para una proteína diana, pero dicha diana podría ser inespecífica en términos de los tipos celulares en los que se expresa». Se ha conseguido actuar exactamente sobre una proteína, pero se sigue desconociendo qué efecto tendrá eso en los diferentes tejidos, si es que lo tiene. El trabajo del equipo de Elowitz nos sugiere que los fármacos deberían ser algo más que «balas mágicas» contra una única molécula; deberían actuar sobre diferentes combinaciones de dianas específicas de tejido para inducir la respuesta deseada.

Sea cual sea la razón de sus principios combinatorios, el sistema de señalización de las BMP demuestra que las células no son como las máquinas que fabricamos los humanos. Según Linton, «esto podría ser cierto para muchos sistemas biológicos. Si solo buscamos analogías con la electrónica, nos quedaremos muy cortos».

Por eso resulta desafiante no solo hablar de los sistemas biológicos, sino también conocerlos y manipularlos. Las analogías electrónicas resultarían idóneas para los que son relativamente simples, como las bacterias en las que Elowitz y Leibler trabajaron hace veinte años. Pero cuando los seres vivos se van complicando, parecen seguir otras reglas, sobre todo cuando se convierten en seres pluricelulares con células genéticamente idénticas que colaboran en estados diversos y especializados.

El principio de funcionamiento ilustrado por el sistema de las BMP podría ser «algo que surge en la naturaleza para dar lugar a tejidos multicelulares más complejos», sostiene Linton, y sugiere que es incluso posible que «esto fuera la innovación que permitió la aparición de organismos como nosotros».

Quizás, entonces, las analogías más útiles para el funcionamiento de las células procedan de la propia biología, como el olfato o el conocimiento. A lo mejor, el único modo para conocer realmente la vida sea por referencia a ella misma.

Philip Ball, doctor en física por la Universidad de Bristol, fue editor de *Nature* durante más de 20 años. Ha escrito numerosos libros y artículos de divulgación científica.



Este artículo apareció originalmente en QuantaMagazine.org, una publicación independiente promovida por la Fundación Simons para potenciar la comprensión pública de la ciencia.



EN NUESTRO ARCHIVO

El caos ordenado de las proteínas. A. Keith Dunker y Richard W. Kriwacki en *IyC*, junio de 2011.

Condensados biomoleculares, una nueva fuente de organización celular. Viviane Callier en *IyC*, junio de 2021.

ECOLOGÍA

¿CUÁNTO CO_2 PUEDEN RETIRAR LOS BOSQUES DE LA ATMÓSFERA?

César Terrer y Félix Picazo | Los niveles elevados del gas estimulan el secuestro de carbono por las plantas, pero el mayor crecimiento vegetal menoscaba el carbono almacenado en los suelos



Durante la fotosíntesis, las plantas absorben CO_2 de la atmósfera y, mediante la energía de la luz solar, disocian el carbono y lo combinan con otros elementos para producir las moléculas orgánicas que conformarán las hojas, las ramas, los troncos y las raíces. Este maravilloso proceso, ejecutado a diario por todos y cada uno de los vegetales que pueblan nuestro planeta, ha alentado la esperanza de que las plantas puedan actuar como un freno natural al cambio climático al retirar el gas de efecto invernadero y fijar el carbono en sus tejidos. Así, a menudo se ha defendido que la plantación masiva de bosques y la conservación de los existentes constituye una estrategia fundamental para extraer el exceso de CO_2 atmosférico derivado de la quema de combustibles fósiles.

Sin embargo, esa idea suele plantearse teniendo en cuenta solo las plantas en sí mismas. Cuando consideramos también los suelos, que almacenan carbono orgánico procedente de los detritos vegetales y animales y de los microorganismos, y evaluamos el proceso en el ecosistema en su conjunto, el balance ya no resulta tan obvio.

Por tanto, comprender y predecir cómo van a responder los ecosistemas terrestres ante el continuo incremento de CO_2 atmosférico asociado a las actividades antropogénicas se ha convertido en una tarea esencial, a la par que urgente.

Con el fin de esclarecer el efecto de los mayores niveles de CO_2 en el carbono almacenado por los ecosistemas en su conjunto, uno de nosotros (Terrer) y sus colaboradores han examinado los datos de numerosos experimentos en los que se simulaba un aumento del CO_2 atmosférico para observar las repercusiones no solo en las plantas, sino también en los suelos. Los resultados de dicho análisis, publicados en *Nature*, han revelado una tendencia opuesta a la esperada.

Fijarse en los suelos

Cada año, las tierras emergidas retiran de la atmósfera alrededor de un 30 por ciento del CO_2 emitido por las actividades humanas, de manera que ese carbono queda «secuestrado» en el suelo o la vegetación. No obstante, ambos compartimentos muestran importantes diferencias a la hora de actuar como sumideros de carbono. Por ejemplo, los suelos representan un almacén con el triple de capacidad respecto al que suponen las plantas, y retienen el doble de carbono del que existe en la atmósfera. De este modo, incluso si todas las tierras emergidas del planeta llegaran a albergar el máximo de vegetación posible, su biomasa solo conseguiría retirar el carbono correspondiente a diez años de nuestras emisiones de gases de efecto invernadero (si se mantuvieran las tasas actuales de emisión).

Además, el carbono de los suelos se almacena de forma mucho más estable y duradera que en la vegetación. En ellos suele permanecer durante siglos o incluso milenios. En comparación, el secuestrado por las plantas es mucho más lábil, ya que cuando estas mueren, parte de su carbono regresa a la atmósfera en un intervalo de tiempo relativamente corto. Todos estos datos parecen invitarnos, pues, a dirigir el foco de atención hacia los suelos.

Se sabe que el aumento de los niveles de CO_2 potencia la fotosíntesis y el crecimiento de las plantas. Sin embargo, no está claro que ello dé lugar a más carbono almacenado en el suelo.

ISTOCK/RTHUR REINERTH

EN SÍNTESIS

Con frecuencia se supone que los ecosistemas forestales tienen un enorme potencial de mitigar el cambio climático, ya que las plantas retiran CO_2 de la atmósfera durante la fotosíntesis.

Pero para cuantificar su capacidad de influir en el clima hay que tener en cuenta no solo el carbono almacenado en la vegetación, sino también en los suelos.

Un análisis global ha demostrado que el mayor secuestro de carbono por las plantas da lugar a una disminución de las reservas de carbono edáfico, sobre todo en los bosques.



EXPERIMENTOS CONTROLADOS: Una de las formas de estudiar la respuesta de los ecosistemas al enriquecimiento del CO_2 atmosférico consiste en inyectar el gas en cámaras abiertas que rodean un fragmento de vegetación.

BRUCE HUNGATE, UNIVERSIDAD DEL NORTE DE ARIZONA

Las pruebas disponibles indican que las reservas de carbono pueden aumentar, disminuir o permanecer sin apenas cambios.

A pesar de esta laguna en nuestra comprensión, los modelos ecosistémicos presuponen que el crecimiento de las plantas y los niveles de carbono del suelo aumentan de forma coordinada. Dado que el suelo es la mayor reserva de carbono terrestre, es importante saber si la cantidad almacenada en él aumentará o disminuirá, para ayudar a reducir la incertidumbre de las predicciones climáticas.

En el estudio liderado por Terrer se ha realizado un análisis global de los datos de 108 experimentos publicados por otros grupos, en los que se aumentaba de manera artificial y controlada el CO_2 del aire que rodeaba las plantas. En ellos se medían los cambios tanto de la biomasa vegetal (una medida indirecta del carbono presente en la vegetación) como del carbono orgánico del suelo.

Los resultados del análisis muestran que los cambios en uno y otro compartimento guardan una relación estrecha. Sin embargo, al contrario de lo esperado, las tendencias de ambos siguen trayectorias opuestas y dependen del tipo de vegetación: en los árboles, el aumento de CO_2 estimula el crecimiento vegetal y el secuestro de carbono en sus tejidos, pero ello suele traducirse en un descenso de las reservas de carbono en el suelo. Por el contrario, los pastizales y los herbazales muestran pequeños incrementos en la biomasa, pero, en general, estos van acompañados de grandes incrementos en las reservas de carbono del suelo. Nos hallamos ante una situación que podríamos denominar «la paradoja de la manta corta», en la que un evento repercute en otro de tal modo que ambos no pueden producirse de manera simultánea: la manta corta permite taparse la cabeza o los pies, pero no ambos extremos a la vez.

¿Qué mecanismo podría subyacer a este fenómeno aparentemente contradictorio? Para responder a esa pregunta, debemos dirigir nuestra atención a la forma en que las plantas acceden a los nutrientes del suelo y cómo se aprovechan de las micorrizas para conseguirlo. Estas estructuras a menudo invisibles se desarrollan en las raíces y corresponden a la simbiosis entre una gran diversidad de hongos y las plantas. En esta asociación, la planta proporciona al hongo hidratos de carbono y vitaminas que este es incapaz de sintetizar por sí mismo; a su vez, el

hongo pone a disposición de la planta una extensísima red de hifas que le permite aumentar su capacidad de captación de nutrientes y agua.

Ante un escenario de crecimiento vegetal propiciado por el aumento del CO_2, las plantas se ven forzadas a captar más recursos del suelo (agua y nutrientes). Ello estimula la actividad de la red de microorganismos que viven asociados a sus raíces, entre ellos las micorrizas. Pero, debido al funcionamiento de su metabolismo, la mayoría de estos microorganismos consumen hidratos de carbono del suelo, que utilizan como «alimento», y emiten CO_2 a la atmósfera como subproducto, lo que hace disminuir el carbono secuestrado en el suelo. Este fenómeno sería especialmente acentuado en los ecosistemas en los que predominan los árboles, puesto que, al crecer más, necesitan más nutrientes y estimulan más la actividad de las micorrizas y otros microorganismos, en comparación con los ecosistemas dominados por matorrales y plantas herbáceas.

Reajustar los modelos

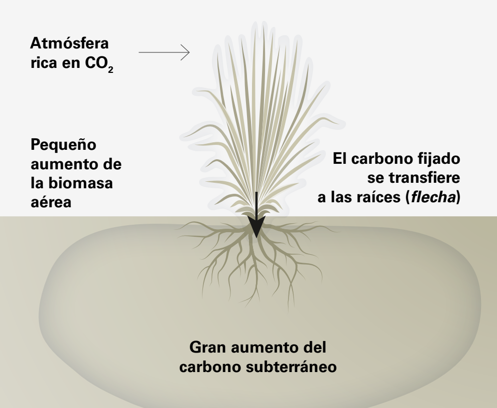
Estos hallazgos tienen implicaciones de gran relevancia, puesto que los modelos ecosistémicos actuales presuponen que la acumulación de biomasa vegetal asociada al aumento del CO_2 conlleva un aumento en el carbono del suelo. Es decir, justo la relación opuesta a la observada por Terrer y sus colaboradores.

Otros trabajos recientes apuntan en la misma dirección que estos resultados. Así, un estudio publicado por Nina L. Friggens, de la Universi-

¿ADÓNDE VA A PARAR EL CARBONO?

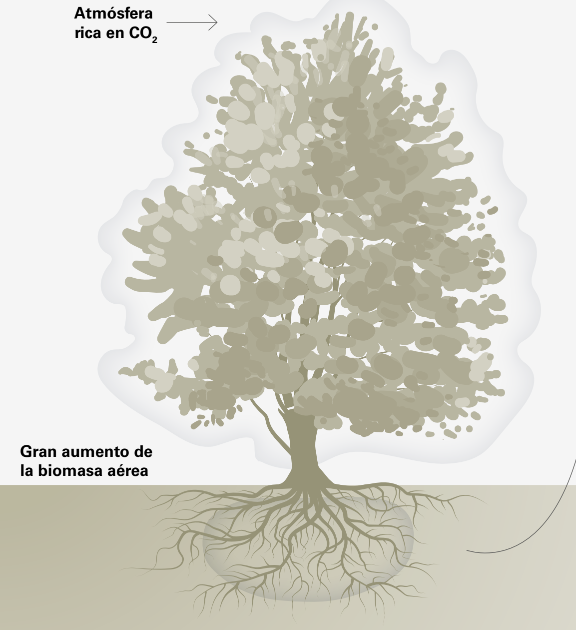
El aumento de CO_2 atmosférico estimula el crecimiento de las plantas, que secuestran más carbono en sus tejidos. Sin embargo, los efectos que ello tiene en el carbono del suelo dependen del tipo de ecosistema considerado. Aquí se ilustran los cambios en dos ecosistemas: los pastizales y los bosques.

PASTIZAL



En los pastizales, los niveles elevados de CO_2 provocan cambios relativamente pequeños en la biomasa, lo que limita las pérdidas de carbono del suelo y favorece su almacenamiento.

BOSQUE



Aumenta la liberación de carbono desde el suelo a la atmósfera

En los bosques, el aumento de CO_2 acelera el crecimiento de los árboles y promueve la incorporación de carbono en el suelo (a través de los detritos orgánicos). Sin embargo, la necesidad de los árboles de obtener más nutrientes estimula la actividad de los microorganismos edáficos, que liberan más CO_2. El equilibrio final entre las ganancias y las pérdidas puede dar lugar a cambios pequeños, neutros o incluso negativos en las reservas de carbono del suelo y en el ecosistema en su conjunto.

VICTOR O. LESHYCK (*ilustración*); FUENTE: «BALANCING CARBON STORAGE UNDER ELEVATED CO_2», CÉSAR TERRER EN *NATURE*, 21 MAYO DE 2021. © NATURE.

dad de Stirling, y sus colaboradores muestra que la plantación de árboles en zonas donde antes había matorrales y herbazales incrementa la respiración del suelo, con la consiguiente emisión de CO_2; de manera que, a largo plazo, la sustitución de un tipo de ecosistema por otro no conlleva una ganancia neta de carbono total. Asimismo, la investigación realizada por Karina Klemmensen, de la Universidad de Ciencias Agrícolas de Suecia, y sus colaboradores demuestra que el proceso de matorralización que se está dando en la tundra ártica como consecuencia del calentamiento global está movilizando el carbono orgánico del suelo hacia la atmósfera.

La plantación de árboles en zonas de matorrales y herbazales incrementa la respiración del suelo, con la consiguiente emisión de CO_2

Todo ello hace pensar que las actuales predicciones sobre la capacidad de los ecosistemas terrestres para almacenar carbono a lo largo de este siglo y mitigar así el cambio climático son demasiado optimistas y deberán revisarse.

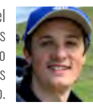
Llegados a este punto, es importante destacar que los experimentos controlados donde se estudia el efecto del aumento del CO_2 no suelen abarcar más de diez años. Sin embargo, la dinámica intrínseca del carbono edáfico determina que se necesiten décadas o siglos para observar su desarrollo definitivo. Por consiguiente, estos experimentos tienen limitaciones a la hora de ofrecer datos que permitan predecir la evolución a largo plazo del carbono en los ecosistemas terrestres en su conjunto.

Aun así, el análisis liderado por Terrer demuestra la necesidad de reajustar los modelos de cambio climático para que recojan la distinta contribución de los ecosistemas terrestres y de sus compartimentos a la hora de secuestrar y retener carbono de la atmósfera.

Además, pone de manifiesto lo contraproducente que puede llegar a ser reforestar de manera masiva ecosistemas naturales dominados por herbáceas (tipo estepa, sabana o tundra), más allá de erosionar la rica y altamente especializada biodiversidad que presentan este tipo de paisajes.

Finalmente, y partiendo de la base de que la mitigación del cambio climático requiere atajar de manera ineludible las emisiones antropogénicas de CO_2, este estudio pone el foco sobre el gran potencial que tendrían los suelos agrícolas para secuestrar carbono si se adoptaran prácticas de laboreo mínimo que permitieran una cobertura permanente de herbáceas.

Al mismo tiempo, se necesitará abordar de manera urgente una serie de retos. Es indispensable evaluar si los efectos del incremento de CO_2 sobre el carbono del suelo (tanto positivos como negativos) observados a corto plazo en los experimentos controlados se acentúan a largo plazo. También se debe investigar qué procesos explican el gran aumento de carbono en los suelos de los pastizales sin que se den grandes incrementos de biomasa aérea. Asimismo, resulta clave determinar si, en términos absolutos y a largo plazo, los bosques almacenan más carbono que los pastizales cuando en el balance se incluye la evolución del carbono del suelo.



César Terrer dirige el Laboratorio de Clima y Ecología en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, en Cambridge. En sus investigaciones aborda preguntas clave sobre el cambio climático y los ecosistemas terrestres a escala global, con atención a las interacciones entre las plantas y el suelo.



Félix Picazo es investigador del Departamento de Ecología y de la Unidad de Excelencia MNat, en la Universidad de Granada. Se interesa por los procesos de los ecosistemas acuáticos de interior y los agroecosistemas, y su respuesta al cambio global.

EN NUESTRO ARCHIVO

Cambio climático, un experimento controlado. Stan D. Wullschleger y Maya Strahl en *IyC*, mayo de 2010.

El bosque mediterráneo ante el cambio global. Enrique Doblas Miranda en *IyC*, abril de 2013.

LA EVOLUCIÓN DEL JUEGO DE LA VIDA (II)



Bartolo Luque | Cómo construir un ordenador a partir de un autómata celular

En la columna anterior presentamos el juego de la vida, o simplemente «vida», el célebre autómata celular creado por John Horton Conway. Descubrimos un buen puñado de patrones, lo que sucede cuando colisionan y alguna aplicación sorprendente, como una calculadora de números primos. Pero en el artículo de este mes iremos un paso más allá: veremos que el juego de la vida tiene capacidad de computación universal (puede calcular cualquier cosa calculable), de modo que es posible usarlo para implementar un ordenador completamente funcional... ¡e incluso para simular el propio juego de la vida!

Martin Gardner escribió varias columnas sobre vida en *Scientific American*. Tras la segunda de ellas, publicada en febrero de 1971, el juego se había vuelto ya tan popular entre los matemáticos e informáticos que un mes más tarde comenzó a circular un boletín bastante artesanal, titulado *Lifeline: A quarterly newsletter for enthusiasts of John Conway's game of life*. Y en su primer número, el matemático Robert Wainwright publicó una clasificación de los patrones del juego de la vida (*véase la figura 1*).

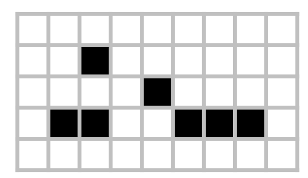
Características				Clase	Ejemplo
Estable	Inactivo			**Clase I** Naturalezas muertas	Bloque
	Activo	Estacionario		**Clase II** Osciladores	Intermitente
		Se desplaza	Número constante de células	**Clase III** Naves	Deslizador
			Número creciente de células	**Clase IV** Cañones y reproductores	Cañón de deslizadores
Inestable	Predecible: muere o evoluciona a una de las clases anteriores.			**Clase V**	Poliominós
	Impredecible y de actividad incesante.			**Clase VI**	Sopas

1. CLASIFICACIÓN: Todos los patrones del juego de la vida pertenecen a una de estas seis clases.

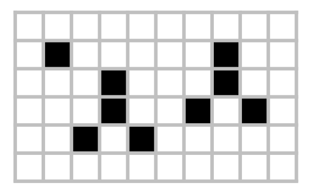
FUENTE: *LIFELINE*, VOL. 1, MARZO DE 1971 (*tabla*); RAPHAELAUGUSTO/WIKIMEDIA COMMONS (*trébol*)

Casi todos los patrones que vimos en la columna anterior pertenecen a una de las cuatro primeras clases recogidas en esa tabla. Las configuraciones de clase I son las naturalezas muertas, patrones que no cambian con el tiempo. La clase II está formada por osciladores estáticos. La clase III agrupa osciladores que se desplazan (las naves), y la clase IV, objetos como los cañones o los reproductores.

¿Hay patrones que no pertenezcan a ninguna de esas cuatro clases? He escrito «casi todos los patrones que vimos» porque el famoso pentominó-R, que como explicamos condujo al descubrimiento del deslizador, no forma parte de ninguna de ellas. En cambio, pertenece a los llamados «matusalenes», configuraciones con menos de 10 bits que no se estabilizan antes de 100 generaciones, entre los que encontramos patrones tan inocentes como la bellota:

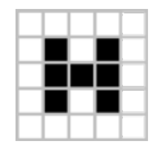


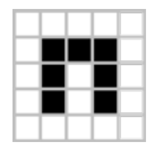
o los conejitos:



La bellota se estabiliza, tras 5206 generaciones, en 633 celdas repartidas en un área de 215 × 168 celdas, mientras que los conejitos cesan su actividad tras la friolera de 17.332 generaciones.

Las configuraciones que no pertenecen a las cuatro primeras clases, pero evolucionan hasta convertirse en alguna o varias de ellas (o simplemente mueren), constituyen la clase V. Dos ejemplos de esta clase serían el patrón de siete células con forma de H, que desaparece en tan solo 6 generaciones, y el heptominó-pi, un matusalén con la forma de la letra griega pi:





El heptominó-pi solo se diferencia de la H en la posición de una célula viva y, sin embargo, tarda 173 generaciones en estabilizarse en 6 bloques, 5 intermitentes y 2 estanques. Estas dos configuraciones ilustran la gran sensibilidad a las condiciones iniciales que exhibe el juego de la vida.

Los patrones de la clase V se comportan de manera errática hasta acabar transformándose en otros de las cuatro clases anteriores. Pero ¿y si cogiéramos un tablero infinito y generásemos al azar una configuración inicial con una cierta densidad media de células vivas? ¿Se estabilizará en algún momento? La existencia de patrones sencillos con crecimiento infinito (aquellos donde el número de células vivas no deja de aumentar, como los cañones de deslizadores) y la imprevisibilidad del juego de la vida permiten aventurar la existencia de «sopas» de este tipo, que presentarían actividad perpetua y formarían una misteriosa clase VI. Así pues, Wainwright cerró su clasificación añadiendo a la tabla estas dos últimas clases.

Una máquina universal de Turing

En general, el juego de la vida no permite predecir el destino de una configuración inicial sin simular su evolución paso a paso. Así que no nos queda más remedio que esperar hasta que caiga en un conjunto de patrones pertenecientes a las cuatro primeras clases. Pero si estamos lidiando con un patrón de la clase VI, esa estabilización quizá no llegue nunca. La existencia de la clase VI indicaría que el destino de ciertos patrones del juego de la vida es «indecidible». Y eso recuerda mucho al famoso problema de la parada.

Dicho problema consiste en determinar de antemano si un programa informático que recibe una cierta entrada se detendrá en algún momento o seguirá ejecutándose para siempre. En 1936, Alan Turing usó el concepto de «máquina universal de Turing», un dispositivo que supuestamente es capaz de computar cualquier función computable, para demostrar que el problema de la parada es indecidible: existen pares programa-entrada para los que no podemos determinar si la ejecución cesará o no.

Si hay programas cuya evolución no se puede pronosticar y es posible codificarlos en el juego de la vida, entonces deben existir patrones impredecibles, configuraciones pertenecientes a la

clase VI. Hubo que esperar al año 2000 para que Paul Rendell consiguiera implementar por primera vez una máquina de Turing en el juego de la vida. Posteriormente, el propio Rendell consiguió una proeza aún mayor al construir una máquina universal de Turing, demostrando así la existencia de patrones de clase VI y la capacidad de computación universal del juego de la vida. (Cada máquina de Turing sirve para un cálculo concreto, y la máquina universal sería capaz de simularlas todas.)

Puertas lógicas y ordenadores

Acabamos de ver que el juego de la vida es «Turing completo»: sus reglas tienen el mismo poder computacional que una máquina universal de Turing, por lo que puede calcular cualquier cosa calculable. Otro modo de demostrar esto es mediante un ordenador habitual, un dispositivo que nos resulta mucho más familiar que las máquinas de Turing. Pero ¿podemos implementar un ordenador en vida?

Un ordenador usa señales eléctricas para codificar secuencias binarias de ceros y unos por medio de dos voltajes diferentes, como 0 y 5 voltios. En el juego de la vida, esas señales binarias pueden codificarse con deslizadores. Por ejemplo, un cañón de Gosper emite un chorro de deslizadores equiespaciados que podemos interpretar como una secuencia de unos:

... 1 1 1 1 1

Sabemos cómo redirigir esa cadena en la dirección que nos plazca y podemos eliminar cualquiera de sus deslizadores mediante colisiones. Por ejemplo, si suprimimos el primero y el tercero del ejemplo anterior, podemos identificar la cadena resultante con la señal binaria

... 1 1 0 1 0

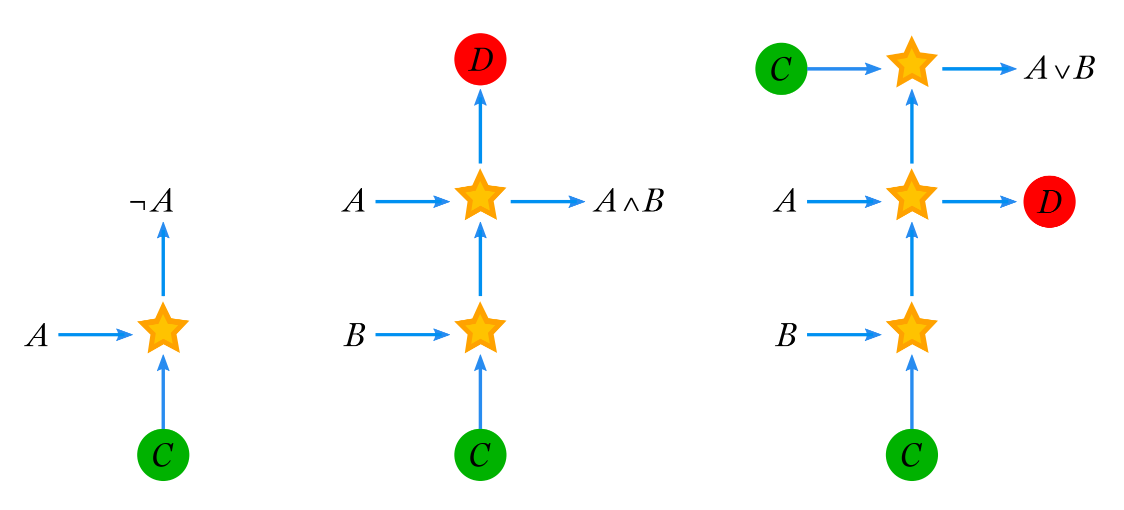
Así, si entendemos la presencia de un deslizador como un 1 y la ausencia de un deslizador que debería estar presente como un 0, podemos codificar cualquier secuencia de ceros y unos mediante una cadena de deslizadores.

Para realizar cálculos, el procesador de un ordenador combina señales eléctricas binarias mediante unos circuitos especiales llamados puertas lógicas digitales. Todas las posibles operaciones binarias entre secuencias se pueden implementar con tan solo tres puertas lógicas muy simples: NOT, AND y OR.

La puerta NOT se comporta igual que la negación en lógica formal. La negación se denota por ¬ y queda definida por la siguiente tabla:

Entrada	Salida
A	$\neg A$
0	1
1	0

De modo que la puerta NOT transforma una señal binaria invirtiendo sus valores, es decir,



2. PUERTAS LÓGICAS: Usando chorros de deslizadores (*flechas*), es posible construir puertas lógicas NOR (*izquierda*), AND (*centro*) y OR (*derecha*) en el juego de la vida. La presencia de un deslizador en una cadena se identifica con el bit 1, y su ausencia, con el 0. Los deslizadores pueden chocar (*estrellas*) y aniquilarse. *A* y *B* son las señales de entrada, *C* son cañones de deslizadores y *D* son devoradores.

cambiando cada 0 por un 1, y viceversa. ¿Cómo podemos implementarla en el juego de la vida? Nuestra señal de entrada será una cadena *A* de deslizadores. Supongamos que esa cadena es

... 1 0 0 1 1

y añadamos un cañón *C* que envíe un chorro continuo de deslizadores

... 1 1 1 1 1

perpendicular a *A*. Es esta segunda cadena la que, tras interaccionar con la incidente, nos proporcionará la señal de salida (*véase la figura 2*).

Cuando en el chorro incidente *A* hay un deslizador (un bit 1), este choca con otro procedente de *C* y ambos se destruyen. Eso genera un hueco (un bit 0) en la cadena de *C*, de modo que el bit 1 de entrada se convierte en un bit 0 de salida. Y si el chorro incidente porta un bit 0 (falta un deslizador), el deslizador de *C* pasa sin chocarse y obtenemos un bit 1 en la salida.

Así, la cadena

... 1 0 0 1 1

se convierte en

... 0 1 1 0 0.

Una puerta lógica AND actúa como el operador $\wedge$ (conjunción) en lógica formal. Transforma dos señales de entrada *A* y *B* de acuerdo con la siguiente tabla:

Entrada		Salida
A	*B*	$A \wedge B$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

La puerta AND solo devolverá un 1 cuando ambas entradas sean 1. Para construirla en el juego de la vida podemos situar de nuevo un cañón *C* perpendicular a los dos chorros de deslizadores *A* y *B*, como vemos en la figura 2. Si esas dos cadenas poseen deslizadores ($A = 1$, $B = 1$) en posiciones homólogas (con un desfase temporal apropiado), el deslizador de *B* colisionará con el de *C* y ambos desaparecerán. Eso permitirá que el deslizador de *A* cruce y genere el valor de salida $A \wedge B = 1$. Si $A = 1$ y $B = 0$, la cadena *B* tiene un hueco y el deslizador de *C* chocará con el de *A* y lo destruirá, produciendo $A \wedge B = 0$. Y es obvio que esa es la misma salida que obtendremos tanto para $A = 0$, $B = 1$ como para $A = 0$, $B = 0$. En este último caso, el deslizador procedente de *C* no choca con ningún otro. Para evitar que «contamine» el tablero de juego, añadimos un devorador *D* que lo eliminará.

Por último, la puerta lógica OR es equivalente al operador lógico $\vee$ (disyunción) y actúa de acuerdo con la siguiente tabla:

Entrada		Salida
A	*B*	$A \vee B$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

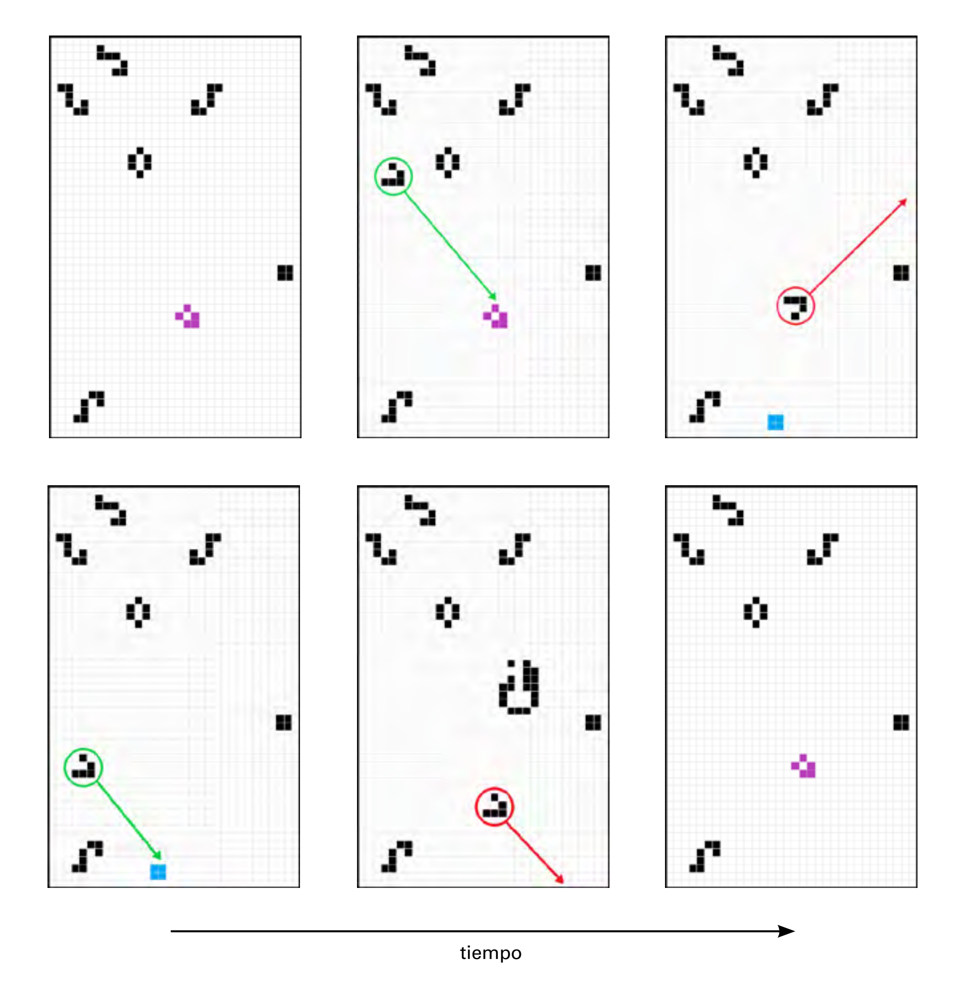
La salida es 1 cuando al menos una entrada es 1. Para implementarla en vida podemos usar un esquema semejante a la puerta AND, pero añadiendo un cañón extra. Solo si $A = 0$ y $B = 0$, el deslizador del cañón inferior chocará con otro del cañón superior y la salida será 0. En el resto de casos, como puede comprobar el lector, la salida será siempre 1.

Para construir una computadora primitiva pero funcional en el juego de la vida, necesitamos utilizar las salidas de esas puertas como entradas para otras. Podemos solucionar esa cuestión por medio de reflectores, patrones que (como vimos en nuestra anterior columna) permiten cambiar la dirección en que se mueve un deslizador.

Memoria

Una vez que disponemos de las puertas lógicas y somos capaces de redirigir las señales, solo nos falta un ingrediente para poder construir un ordenador en vida: memoria.

Una de las formas más simples de abordar este problema en los circuitos electrónicos es emplear interruptores biestables, circuitos sencillos que pueden almacenar un bit. Una vez «presionados» mediante una señal eléctrica, estos interruptores adquieren el estado 0 o 1 y lo mantienen (lo recuerdan) hasta que volvamos a presionarlos. Además, es posible «leerlos» sin modificarlos.



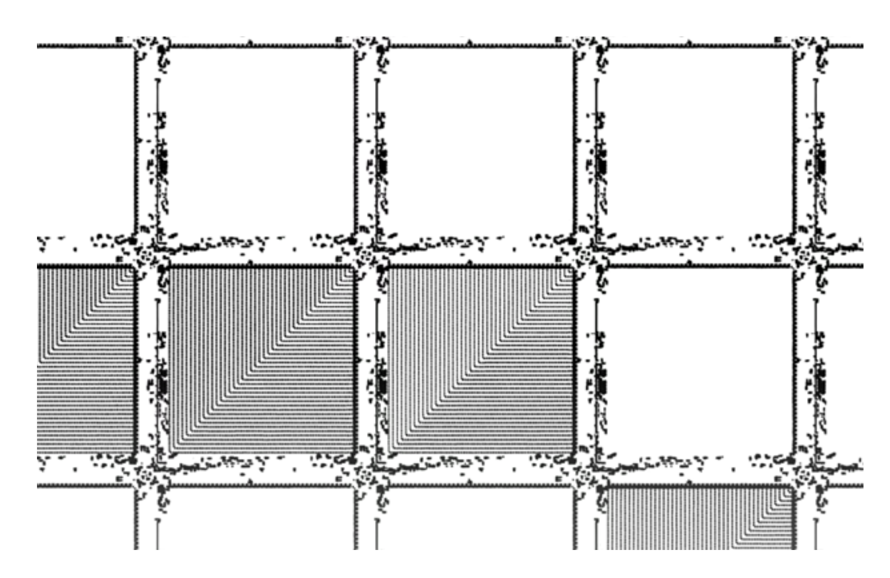
3. MEMORIA: Un patrón con 7 naturalezas muertas actúa como un interruptor biestable, el componente básico de las memorias de los ordenadores. Los estados 0 y 1 se representan mediante un bote (*morado*) y un bloque (*azul*), respectivamente. Cuando lanzamos un deslizador contra el bote (*fila de arriba*), la colisión genera un bloque y otro deslizador en una dirección perpendicular a la original. Si enviamos otro deslizador contra ese nuevo bloque (*fila de abajo*), aparece un deslizador que se mueve en paralelo al incidente y se restaura el bote.

Se puede construir un interruptor biestable en vida usando cuatro puertas lógicas, como suele hacerse en electrónica. Pero hay patrones mucho más pequeños que cumplen la misma función, como el interruptor biestable que descubrió Paul Callahan en 1994 (*véase la figura 3*).

El interruptor está formado por 7 naturalezas muertas elementales: 4 devoradores, 1 colmena y 1 bloque que actúan como «catalizadores» (permanecen siempre), junto con 1 bote que representa el estado 0. Cuando un deslizador entra en una dirección determinada, choca con el bote y lo transforma en un nuevo bloque, que codifica el estado 1. Además, la colisión produce un deslizador perpendicular al incidente.

De forma análoga, si un deslizador colisiona de manera apropiada con ese bloque (estado 1), se restaura el bote (estado 0) y se genera un deslizador de salida paralelo al incidente. En ambos casos, la dirección de salida del deslizador nos informa del contenido de la memoria. Además, si un deslizador entra en el interruptor con la dirección adecuada para colisionar con el bote cuando en realidad hay un bloque, o viceversa, atraviesa el dispositivo sin afectarlo.

En su obra de 1982 *Winning ways for your mathematical plays*, Elwyn R. Berlekamp, Conway y Richard K. Guy ya exponían las puertas lógicas que hemos visto y memorias similares. La posibilidad técnica de construir un ordenador en el juego de la vida quedaba probada, aunque seguramente nadie pensó que se llegaría a materializar algún día. Al menos hasta 2016, año en que el físico Nicolas Loizeau



4. VIDA EN VIDA: El juego de la vida puede usarse para crear una simulación del propio juego de la vida. Las células activas (*puntos negros pequeños*) generan «metapíxeles» (*cuadrados grandes*) que, a su vez, actúan como células.

ADAPTADO A PARTIR DEL VÍDEO«LIFE IN LIFE» DE PHILLIP BRADBURY, DISPONIBLE EN WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=XP5-1IEKXE8

construyó una computadora programable de 8 bits que soportaba ocho variables y trece instrucciones. Loizeau erigió esta pequeña catedral repitiendo tan solo cuatro patrones básicos relacionados con los deslizadores: un cañón de período 60, un reflector de 90 grados, un duplicador y un devorador. El lector puede entrar en detalles y admirar la belleza del funcionamiento del ordenador de Loizeau en este vídeo o accediendo a su página web.

Si podemos construir una máquina universal de Turing o un ordenador programable totalmente funcional, entonces también es posible simular el propio juego de la vida dentro del juego de la vida, y así hasta el infinito. Eso se logró gracias a los «metapíxeles», creados en 2005, y el lector puede disfrutarlo en un hipnótico vídeo de Phillip Bradbury. (*La figura 4 muestra una captura de ese vídeo*.)

El juego de la vida sobrepasó las expectativas de su propio creador, y espero haberles convencido de la extraordinaria complejidad que puede exhibir pese a la sencillez de sus reglas. Visto lo visto, es inevitable especular sobre qué sucedería si jugásemos a vida sobre un tablero infinitamente grande, sembrado con patrones aleatorios y sin límite de tiempo. ¿Podría surgir de esa sopa primitiva alguna forma de vida o inteligencia artificial? Les parezca verosímil o no, espero que el juego de la vida les haya resultado lo bastante fascinante como para explorarlo o modificarlo por su cuenta y sientan lo mismo que su creador John Horton Conway al explorar el universo de las matemáticas:

Imaginemos un planeta deshabitado, lleno de cosas interesantes. Aterrizamos en él y, aunque ha existido durante un millón de años, nadie ha estado nunca allí, ningún ser sensible. Hay lugares así, estoy seguro. Pero no hace falta viajar a ellos: uno puede sentarse en esta misma silla y descubrir algo que ha existido toda la eternidad, y ser la primera persona en explorarlo.

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



PARA SABER MÁS

Turing machine universality of the game of life. Paul Rendell. Tesis doctoral, Universidad del Oeste de Inglaterra, enero de 2014.

Genius at play: The curious mind of John Horton Conway. Siobhan Roberts. Bloomsbury, 2015.

Conway's game of life. Documental de Alan Zucconi, octubre de 2020. Disponible en www.youtube.com/watch?v=Kk2MH9O4pXY.

Game of life: computer with display. Vídeo de Nicolas Loizeau, octubre de 2021. Disponible en https://www.youtube.com/watch?v=WfuhbI8HE7s.

EN NUESTRO ARCHIVO

El juego de la vida. Agustín Rayo en *IyC*, diciembre de 2010.

El juego de la vida. Martin Gardner en *El universo matemágico de Martin Gardner*, colección TEMAS de *IyC*, n.º 77, 2014.

La evolución del juego de la vida. Bartolo Luque en *IyC*, enero de 2022.